

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

Aplikace zrychlených zkoušek spolehlivosti u
závodních automobilů

Application of Accelerated Life Testing for Racing
Cars

Student:	Bc. Vojtěch Mikulka
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jan Famfulík, Ph.D

Ostrava 2013

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vojtěch Mikulka**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T003 Dopravní technika a technologie
Specializace: 20 Silniční doprava
Téma: **Aplikace zrychlených zkoušek spolehlivosti u závodních automobilů**
Application of Accelerated Life Testing for Racing Cars

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Vstupní požadavky na spolehlivost závodních vozidel
3. Matematická teorie spolehlivosti a použití zkušebních plánů
4. Modely zrychlených zkoušek spolehlivosti a podmínky použití
5. Návrh zkoušek vozidla
6. Závěrečná doporučení

Seznam doporučené odborné literatury:

Life Data Analysis Reference [online]. Tucson: ReliaSoft Corporation, 2007. Dostupné z <http://www.weibull.com/>.

Accelerated Life Testing Analysis [online]. [cit. 2009-11-16]. Dostupné z WWW: <http://www.weibull.com/acceltestwebcontents.htm>.

FAMFULÍK, Jan; MÍKOVÁ, Jana; KRZYŽANEK, Radek. Teorie údržby [online]. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2007. Dostupné z WWW: <http://home1.vsb.cz/~krz011/>. ISBN 978-80-248-1509-1.

Famfulík, J.: Zkoušky spolehlivosti (vybrané stochastické metody). Ostrava: VŠB TU Ostrava. 2010.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jan Famfulík, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



Aleš Slíva

doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry

Ivo Hlavatý

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20. 5. 2013

Mikulka
.....
Vojtěch Mikulka

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 20. 5. 2013



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Vojtěch Mikulka

Adresa trvalého pobytu autora práce: Bezručova 21, 602 00 Brno

Dovoluji si na tomto místě poděkovat panu doc. Ing. Janu Famfulíkovi, Ph.D a panu ing Pavlu Dreslerovi za vedení a cenné rady, které mi poskytovali a bez jejichž vstřícnosti by tato práce nevznikla.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

MIKULKA, V. *Aplikace zrychlených zkoušek spolehlivosti u závodních automobilů diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2013, 68 s. diplomová práce, vedoucí: Famfulík, J.

V první části práce jsou popsány specifika vývoje a provozu závodních automobilů z hlediska řešení spolehlivosti. Následují definice a přehled matematického aparátu pro návrhy zkušebních plánů a vyhodnocování zkoušek spolehlivosti. Další kapitola představuje zrychlené zkoušky a vhodné matematické modely. Závěrečná část práce se věnuje už pouze vybraným částem závodních vozů a obsahuje konkrétní návrhy a výpočty pro zrychlené zkoušky spolehlivosti.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

MIKULKA, V. *Aplication of Accelerated Life Testing for Racing Cars: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, 2013, 68 p. Thesis head: Famfulík, J.

The first part of the master thesis deals with the development specifics and operation of racing cars from the viewpoint of reliability solutions. The definition and overview of the mathematical apparatus for test plan concepts and reliability test evaluations follow. The next chapter introduces accelerated tests and suitable mathematical models. The final part of the thesis only deals with selected parts of racing cars and contains concrete propositions and calculations for accelerated reliability tests.

OBSAH

Seznam použitého značení, zkratk a termínů.....	8
1 Úvod	9
2 Spolehlivost závodních vozidel	11
2.1 Vývoj závodních automobilů.....	12
3 Náhodná veličina.....	14
3.1 Vybrané charakteristiky spojitě náhodné veličiny.....	14
3.2 Vybraná rozdělení spojitě náhodné veličiny.....	16
3.2.1 Exponenciální rozdělení	16
3.2.2 Weibullovo rozdělení.....	16
3.2.3 Normální rozdělení	17
4 Druhy zkoušek.....	19
4.1 Zkušební plány.....	20
4.1.1 Druhy zkušebních plánů	20
4.1.2 Extrémní případy zkušebních plánů	21
5 Zrychlené zkoušky spolehlivosti.....	24
5.1 Druhy zrychlených zkoušek.....	24
5.1.1 Kvalitativní zrychlené zkoušky	24
5.1.2 Kvantitativní zrychlené zkoušky	24
5.2 Způsoby zrychlení zkoušek [5].....	24
5.2.1 Zrychlení větším využitím [5]	24
5.2.2 Zrychlení přetížením.....	25
5.3 Modely zrychlených zkoušek přetížením	26
5.3.1 Arrheinův model	27
5.3.2 Eyringův model.....	28
5.3.3 Model inverzní mocninné křivky.....	29
5.3.4 Teplotně-netepelný model	31
5.3.5 Model časově proměnného zatížení.....	32
6 Vlivy působící na opotřebení součástí.....	33
6.1 Elektronika.....	33
6.2 Motor	34
6.3 Převodovka	34
7 Aplikace zrychlených zkoušek.....	36
7.1 Elektronika.....	36
7.2 Motor	51
7.2.1 Hmotnosti nasátého vzduchu	51
7.2.2 Množství spotřebovaného paliva	57
7.2.3 Střední pístová rychlost	58
7.3 Převodovka	58
8 Příklady.....	59
8.1 Elektronika.....	59
8.2 Motor	61
8.2.1 Běžné zkoušky	62
8.2.2 Zrychlené zkoušky	63
9 Závěr	65
Seznam použitých pramenů	67

Seznam použitého značení, zkratek a termínů

A_F	faktor zrychlení
$L(t)$	parametr spolehlivosti
RZ	rychlostní zkoušky
T	náhodná veličina
$T [K]$	teplota
\hat{T}_{SD}	dolní odhad
$f(t)$	hustota pravděpodobnosti
$t [h]$	čas v hodinách
α	hladina významnosti
λ	intenzita poruch
μ	střední hodnota
σ	směrodatná odchylka
$\tau [h]$	doba trvání zkoušky v hodinách
$\chi^2_{2v,1-\alpha}$	hodnota statistiky chí-kvadrát
WRC	World Rally car

1 Úvod

Cílem této práce je vypracování postupů pro použití zrychlených zkoušek spolehlivosti vybraných částí závodních automobilů. Na začátku je vhodné zmínit se o samotném automobilovém sportu a krátce ho uvést. Jeho počátky jsou těsně spojeny s počátky motorismu. Snad hned druhý vyrobený automobil chtěl dokázat, že je lepší než ten první. Závodit se dá v různých disciplínách, ať už v rychlosti, či vytrvalosti a odolnosti, nebo třeba ve spotřebě. Přesto má toto soutěžení jeden společný prvek a tím je automobil. Ten se časem vyvíjel. Nejprve byl prakticky shodný s tím, který jste si mohli zakoupit běžně v autosalónu, časem se však začaly čím dál více odlišovat od sériových vozů. Bylo to způsobeno snahou o vyšší výkony, ale také vznikem předpisů, kladoucích požadavky na bezpečnost závodních automobilů. Začaly se tak vytvářet různé kategorie automobilového závodění [12]:

- Okruhové závody: jezdí se na okruzích, tedy tratích, které začínají a končí v jednom místě. Jsou buď uměle vybudované, nebo k tomuto účelu mohou posloužit i běžné komunikace.
- Automobilové soutěže: jezdí se na určitých úsecích běžných nebo speciálně k tomu účelu postavených komunikacích. Mezi ně patří rallye.
- Závody do vrchu: tyto závody se vyznačují zejména tím, že automobily na nich musí překonat určité, často poměrně velké, převýšení.
- Off-road závody: jezdí se na nezpevněných tratích a jejich charakteristikou je těžký terén.
- Drifting: jde o poměrně novou disciplínu, při které se zatáčky projíždějí řízeným přetáčivým smykem.
- Drag: jedná se ve své podstatě o závody ve zrychlení, se speciálními automobily konstruovanými k tomuto účelu.
- Automobilový slalom: probíhá na dráze se zpevněným povrchem a s uměle vytvořenými překážkami.

Tato práce je zaměřena zejména na vozidla jezdící rallye. Jedná se o automobilové soutěže, které se konají na běžných komunikacích, se zpevněným i nezpevněným

povrchem. Jednotlivé závody se skládají z tzv. „RZ“ neboli rychlostních zkoušek, tedy úseků na kterých se měří doba, za kterou je jednotlivé vozy projedou a přejezdů, které spojují jednotlivé rychlostní zkoušky a probíhají za běžného provozu při dodržování dopravních předpisů. Závodí se na různých úrovních, jezdí se mistrovství České republiky, Evropský šampionát, Mistrovství světa a další šampionáty. Automobily jsou rozřazeny do různých kategorií [13]:

- produkční vozy: umožňují nejmenší stupeň úprav, řazení musí být klasické a objem motoru je omezen na 2000 cm^3 , je povoleno přeplňování,
- S 1600: použitou technikou se liší od sériových automobilů z kterých vycházejí, převodovky bývají sekvenční a motor musí mít atmosférické plnění a objem maximálně 1600 cm^3 ,
- S 2000: podobná předchozí kategorii, ale obsah motoru je omezen na 2000 cm^3 ,
- WRC: díky vysokému stupni úprav mají se sériovými vozy většinou shodné pouze některé části karoserie, jsou používány sekvenční převodovky a motory s přeplňováním s objemem do 2000 cm^3 .

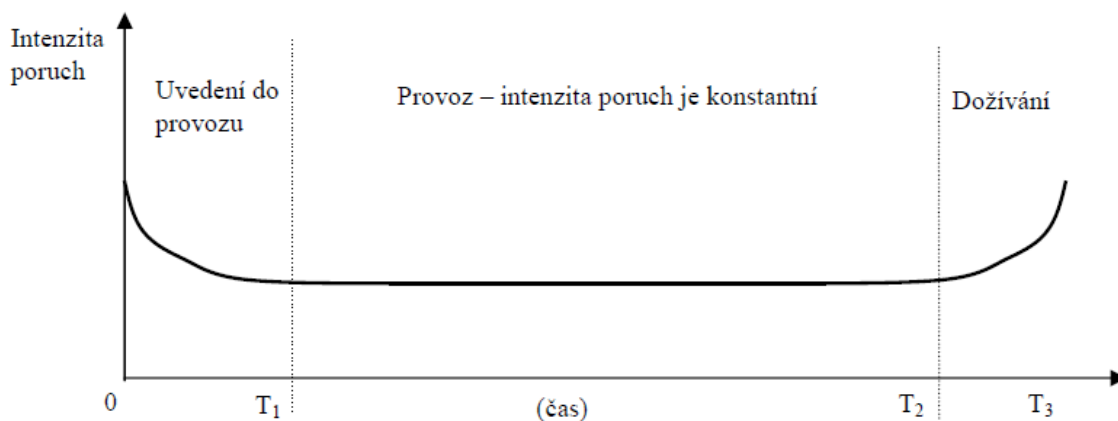
2 Spolehlivost závodních vozidel

Definice spolehlivosti se v průběhu času vyvíjela. Dnes je definována jako obecná schopnost výrobku plnit požadovanou funkci po stanovenou dobu a v daných podmínkách. [1] Nároky na spolehlivost jsou v automobilovém sportu velké. Je požadována vysoká bezporuchovost, aby bylo možné dokončit závod, protože i z pohledu reprezentace je lepší mít dobré výkony stále, než výborné, ale jen občas. Navíc každý závod představuje pro tým velké finanční náklady a je žádoucí, aby tyto náklady přinesly nějaký užitek místo ztráty v podobě odtahu vozidla poškozeného poruchou. Proto je dobré investovat čas a ostatní prostředky do zjišťování spolehlivosti. Na druhé straně je k dosažení dobrých výsledků nutný rychlý vývoj komponent a různých celků závodních vozidel. Přitom právě zkoušky spolehlivosti celý vývoj zpomalují, jsou i finančně náročné, zvláště zkoušíme-li výrobek postupně zlepšovat. V automobilovém sportu také není vhodné součástky příliš předimenzovat, to totiž často zvyšuje jejich cenu a hmotnost. Je tedy velmi vhodné zkrátit dobu zkoušky, ale přitom nesnížit její vypovídací hodnotu. To umožňují právě zrychlené zkoušky spolehlivosti.

Závodní automobil je strojírenský výrobek a tak k popisu jeho spolehlivosti a vlastně celého života používáme obecné veličiny jako je intenzita poruch. „Empiricky ji lze vyjádřit jako počet poruch za jednotku času.“ [2] Termín porucha lze odborně definovat jako „částečnou nebo úplnou ztrátu schopnosti provozu soustavy nebo prvku. Pokud dojde ke změně schopnosti provozu, rozhoduje se, zda jde o poruchu.“ [2]

Život vozidla, a to i závodního, lze popsat vanovou křivkou. Její příklad je v grafu 2.1. Vyjadřuje závislost intenzity poruch na čase nebo kilometrickém proběhu vozidla. Křivku lze rozdělit na tři části. V první intenzita poruch postupně klesá, jedná se o záběh. Zde se mohou projevit například nepřesnosti při výrobě. V další části už intenzita poruch poklesla na své minimum (ovšem nikdy nebude nulová) a je konstantní. Je to období běžného života vozidla, tedy v případě závodních automobilů tréninky, testování a závody. Poslední část je už jen dožívání výrobku, kdy intenzita poruch začíná stoupat. Závodní automobily se už v této fázi neprovozují. Z pohledu spolehlivosti je zajímavý přechod z fáze běžného života do poslední fáze. Chceme totiž co nejvíce využít inherentní spolehlivost, tedy spolehlivost, kterou do výrobku vložily konstrukce a výroba. Přitom ale nechceme riskovat, že vozidlo, nebo některá jeho část vstoupí při závodě do poslední fáze a tím začne stoupat i

pravděpodobnost výskytu poruchy. Musíme si tedy uvědomit, že parametry spolehlivosti se s časem nebo ujetou vzdáleností mění.



Graf 2.1: Vanová křivka [2]

V životě závodního automobilu jsou důležité zejména tyto provozní stavy:

- Testovací jízdy: často probíhají na tratích s různým povrchem. Zkoušejí se nastavení vozu, různé konstrukce jednotlivých částí atd. Další zkoušky jsou zaměřeny na spolehlivost. Tyto testy většinou spočívají v ujetí určitých kilometrů, které vůz musí zvládnout bez vážné poruchy. Ověřuje se tedy schopnost vozu zvládnout dané závody.
- Závod: sestává z rychlostních zkoušek na závodní trati, která je uzavřena běžnému provozu a z přejezdů mezi rychlostními zkouškami, které probíhají na běžných komunikacích za normálního provozu.

2.1 Vývoj závodních automobilů

K vývoji závodního automobilu a jeho částí dochází průběžně v celé jeho životnosti. Mění se komponenty, nastavení atd. a to i pro jednotlivé tratě.

Při vývoji vozidel se používají laboratorní i jízdní zkoušky, jako jsou například:

- Zkoušky na zkušebním zařízení: většinou probíhají ještě před uvedením vozu nebo jeho části do ostrého provozu. Provádí se v laboratoři na motorové brzdě, válcové zkušebně apod. Mohou se zkoušet různá nastavení, ale i ověřovat spolehlivostní parametry atd.

- Zkoušky životnosti: probíhají na vyrobeném automobilu, který najíždí v závodním a přejezdovém režimu určitý počet kilometrů odpovídající požadované životnosti.
- Vývojové zkoušky: jsou zaměřeny na vyhledání optimálního nastavení konkrétních funkčních celků.

Pro následující část je nutné definovat význam slova opotřebení. Pro účel této práce ho lze definovat jako postupné zhoršování spolehlivostních parametrů výrobku.

Při stanovení požadavků na spolehlivost závodních automobilů je nespornou výhodou, že je předem poměrně přesně zřejmé kolik hodin, resp. kolik kilometrů musí vozidlo ujet bez poruchy. Toto může být dáno předpisy, které určují, kolik závodní tým může použít například motorů za sezónu, ale i finanční situací týmu atd. Jsou známé délky jednotlivých závodů, přejezdů a lze naplánovat i tréninky. Po tuto dobu však očekáváme od vozidla vysokou spolehlivost a to i při jeho extrémním zatížení.

3 Náhodná veličina

V praxi nelze s naprostou jistotou určit v jaké chvíli dojde k poruše. [1] [2] Jedná se tedy o náhodnou veličinu a to ať už mluvíme o době do poruchy, počtu poruch za určitou dobu apod. Každé hodnotě však můžeme přiřadit určitou pravděpodobnost jejího výskytu. Toto je důležité z hlediska popisu náhodné veličiny. Pravděpodobnost výskytu náhodné veličiny bývá často vyjadřována v závislosti na době provozu nebo například kilometrickém proběhu. Tato hodnota může být na určitém intervalu konstantní (rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti) nebo může mít různý průběh (viz. kapitola 3.2). Podle její změny můžeme rozlišovat náhodné veličiny jako [1]:

- spojité – plynule mění svou hodnotu, např. doba do poruchy žárovky,
- diskrétní – změna jejich hodnoty je skoková nebo je definována jen pro určité hodnoty, např. počet poruch při zkoušce.

3.1 Vybrané charakteristiky spojité náhodné veličiny

“Zákonitost, která přiřazuje hodnotám náhodné veličiny jejich pravděpodobnosti je označována jako rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny.“ [3] K jejímu popisu jsou nejčastěji používány tyto charakteristiky [1]:

Distribuční funkce

“Distribuční funkce náhodné veličiny $F(t)$ je definována jako pravděpodobnost, že náhodná veličina T je menší nebo rovná hodnotě t , pak:“ [1]

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt \quad (3.1)$$

kde:

t – hodnota náhodné veličiny T ,

$P(T)$ – pravděpodobnost náhodné veličiny T ,

$f(t)$ – hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny.

Doplňěk distribuční funkce

“Doplňěk k distribuční funkci $R(t)$ představuje pravděpodobnost, že náhodná veličina T nabude hodnoty větší než hodnota t , platí:“ [1]

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{+\infty} f(t) dt \quad (3.2)$$

Tento doplněk bývá také označován jako bezporuchovost.

Intenzita

Jako příklad je možné uvést intenzitu poruch. Ta je zmíněna výše v kapitole 2 včetně empirického vyjádření. “Intenzita náhodné veličiny $\lambda(t)$ představuje podmíněnou pravděpodobnost toho, že jev nastane během nekonečně malého intervalu dt za podmínky, že do okamžiku t jev dosud nenastal. Je možné ji vyjádřit pomocí vztahu:“ [1]

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.3)$$

Střední hodnota

Patří k základním charakteristikám polohy [1]: „Střední hodnota $E(T)$ je hodnota, kolem které se hodnoty náhodné veličiny při opakování pokusů náhodně umísťují.“ Její matematické vyjádření:

$$E(T) = \int_{-\infty}^{+\infty} t \cdot f(t) dt \quad (3.4)$$

Rozptyl

„Rozptyl náhodné veličiny $D(T)$ představuje míru variability (rozptýlení) jednotlivých hodnot náhodné veličiny.“ [1]

$$D(T) = \int_{-\infty}^{+\infty} [t - E(T)]^2 \cdot f(t) dt \quad (3.5)$$

Směrodatná odchylka

„Směrodatná odchylka náhodné veličiny $\sigma(T)$ je definována jako odmocnina rozptylu a je tedy dána vztahem:“ [1]

$$\sigma(T) = \sqrt{D(T)} \quad (3.6)$$

3.2 Vybraná rozdělení spojitě náhodné veličiny

Rozdělení pravděpodobnosti spojitě náhodné veličiny popisuje průběh některých charakteristik jako je distribuční funkce, hustota pravděpodobnosti či bezporuchovost v závislosti na časovém či kilometrickém proběhu a případně i jiných veličinách. Tedy udává chování výrobku v čase z pohledu spolehlivosti. Je jasné, že různé výrobky se budou v čase chovat různě. To je dáno už jejich konstrukcí, kde může docházet k mechanickému opotřebením, kvalitou výroby atd. Pro následující kapitoly je nutné zmínit některá vybraná rozdělení spojitě náhodné veličiny.

3.2.1 Exponenciální rozdělení

Toto rozdělení je charakteristické konstantní intenzitou poruch λ v celém průběhu. Používá se tedy k popisu výrobků, u nichž nedochází k opotřebením, ale poruchy se vyskytují náhodně a náhle. Jako příklad je možné uvést elektroniku. [1]

Hustota pravděpodobnosti [1]:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (3.9)$$

kde:

λ – intenzita poruch,

t – hodnota náhodné veličiny T [h].

Distribuční funkce [1]:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad (3.10)$$

Bezporuchovost [1]:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (3.11)$$

3.2.2 Weibullovo rozdělení

Velkou výhodou Weibullova rozdělení je jeho variabilita. Lze ním nahradit i jiná rozdělení a lze ho použít pro různé části vozidla. S tím ale souvisí i to, že k jeho vyjádření je třeba více parametrů než např. u exponenciálního rozdělení. Pro náš účel postačí jeho dvouparametrická varianta. [1]

Distribuční funkce [1]:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^m} \quad (3.12)$$

kde:

t – hodnota náhodné veličiny T [h],

t_0 – parametr měřítka [h]

m – parametr tvaru

Hustota pravděpodobnosti [1]:

$$f(t) = \frac{m}{t_0} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^{m-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^m} \quad (3.13)$$

Bezporuchovost [1]:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^m} \quad (3.14)$$

3.2.3 Normální rozdělení

Toto rozdělení je vhodné k popisu veličin, na které působí mnoho vlivů, ale žádný není dominantní. Jedním z jeho parametrů je střední hodnota. Je to hodnota, která má nejvyšší pravděpodobnost. Čím jsou hodnoty náhodné veličiny vzdálenější od této hodnoty, tím je pravděpodobnost jejich výskytu nižší. Druhým parametrem tohoto rozdělení je rozptyl. [1]

Distribuční funkce [1]:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.15)$$

kde:

t – hodnota náhodné veličiny T ,

μ – střední hodnota,

σ – směrodatná odchylka.

Střední hodnota [4]:

$$\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.16)$$

kde:

n – počet hodnot (měření),

x_i – jednotlivé hodnoty.

Rozptyl [4]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.17)$$

kde:

\bar{x} – odhad střední hodnoty.

Směrodatná odchylka [4]:

Směrodatná odchylka σ je odmocnina z rozptylu σ^2 .

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (3.18)$$

4 Druhy zkoušek

Pro větší přehlednost a snadnější pochopení je vhodné uvést rozdělení zkoušek. Odlišnosti jednotlivých druhů se přenášejí nejen do průběhu, ale i způsobu vyhodnocování zkoušek. Rozdělujeme je podle těchto kritérií:

Podle všeobecného účelu

- Zkoušky určující: slouží k odhadu ukazatelů bezporuchovosti zkoumaného objektu. [11] [1]
- Ověřovací zkoušky: mají využití při zjišťování, zda zkoumaný objekt splnil požadavky spolehlivosti. [11] [1]
- Srovnávací zkoušky: umožňují porovnání ukazatelů spolehlivosti dvou objektů. [11] [1]

Podle místa zkoušky

- Zkoušky v provozu: zkoušený výrobek je sledován při svém běžném nasazení. [11]
- Laboratorní zkoušky: probíhají v laboratořích, kde se vytváří požadované podmínky, které mohou být podobné provozu nebo například ztížené. [11]

Podle doby získávání výsledků

- Normální zkouška: je prováděna za běžných pracovních podmínek výrobku a její trvání je omezeno pouze dosažením požadované věrohodnosti výsledku. [11]
- Zkrácená zkouška: zpravidla končí dříve, než dojde k poruše všech zkoušených subsystémů. Používá se tam, kde se v jednom výrobku tyto subsystémy opakují. [11] [1]
- Zrychlená zkouška: umožňuje získání informací o ukazatelích spolehlivosti dříve, než by k tomu došlo u normální zkoušky.

Důležité pojmy z oblasti zkoušek, které se v této práci vyskytují, jsou:

- Konfidenční interval: „Je to interval (omezený dolní a horní mezí), do něhož ukazatel spolehlivosti padne s předem задanou pravděpodobností.“ [1] Dále zmiňovaný dolní odhad střední hodnoty \hat{T}_{SD} je tedy jeho dolní mezí.
- Konfidenční úroveň: „Je pravděpodobnost, s jakou se daný ukazatel spolehlivosti nachází v předem stanovených mezích t.j. v konfidenčním intervalu.“ [1]
- Hladina významnosti α : Je to pravděpodobnost chyby prvního druhu – tedy že dojde k zamítnutí pravdivé nulové hypotézy (při statistickém testu ověřujeme její platnost).

4.1 Zkušební plány

Zkoušky spolehlivosti jsou většinou založeny na náhodném výběru. Nezkoušíme tedy všechny výrobky (celou populaci), ale jen část. Toto je podstatné zejména z ekonomického hlediska, protože zkouška spolehlivosti často končí znehodnocením výrobků, případně má zkoušený výrobek již zkrácenou životnost a nelze ho proto prodat. K zjištění doby do poruchy je také nutné počkat na vznik poruchy. Jistě by bylo výhodné nečekat na poruchu u všech výrobků, neboť by to vedlo k časovým i finančním úsporám. To nám umožňuje použití zkušebních plánů. Nemusíme čekat do poruchy posledního zkoušeného výrobku, jehož životnost se může značně lišit od průměru v náhodném výběru, ale zkoušku lze ukončit při výskytu určitého počtu poruch nebo po uplynutí daného času. Lze je tedy užít jako ověřovací zkoušky, zda výrobek splňuje dané požadavky. [1]

4.1.1 Druhy zkušebních plánů

Zde jsou uvedeny základní druhy běžných zkušebních plánů. Více k této problematice naleznete v literatuře [1].

- úplný zkušební plán – zkouška končí poruchou všech výrobků z náhodného výběru – ty nejsou nahrazovány ani opravovány,
- r-plán – zkouška končí v čase, kdy dojde k předem stanovenému počtu poruch. Zjišťovanou veličinou je tedy doba do poruchy. Výrobky se v průběhu zkoušky mohou opravovat, nahrazovat nebo vyřazovat.

- t-plán – zkouška je omezena předem stanovenou dobou trvání. Zjišťujeme, u kolika výrobků v tomto časovém intervalu došlo k poruše.
- progresivně cenzurovaný plán – rozděluje výrobky do dvou skupin. U jedné se zjišťuje doba do poruchy (r-plán) a u druhé počet poruch (t-plán).

Vyhodnocení zkoušek prováděných podle takovýchto plánů, v případě prvku popsaného exponenciálním rozdělením, se provádí podle tohoto vzorce:

$$\hat{T}_{SD} \geq \frac{2 \cdot T_{AKU}}{\chi^2_{2v, 1-\alpha}} \quad (4.1)$$

kde:

\hat{T}_{SD} – dolní odhad střední doby do poruchy

T_{AKU} – akumulovaný pracovní čas

$\chi^2_{2v, 1-\alpha}$ – hodnota statistiky chí-kvadrát pro 2v stupňů volnosti

a hladinu významnosti α

Akumulovaný pracovní čas T_{AKU} je součet dob, kdy byly zkoušené výrobky v provozu. Výpočet této veličiny se pro jednotlivé plány liší. [1]

Pro automobilový sport nejsou tyto obecné případy příliš zajímavé, ale jejich pochopení je důležité, protože z nich vycházejí ostatní případy zkušebních plánů.

4.1.2 Extrémní případy zkušebních plánů

Právě tyto případy jsou z pohledu automobilového sportu důležité, protože umožňují vyhodnotit zkoušku i jediného prvku. Nemusíme tedy vyrábět celou sérii. Proto se jimi budu zabývat více.

Zkouška jediného prvku bez poruchy

Zkouška jediného prvku bez poruchy je omezena časem, jedná se tedy o t-plán. Zkouška nekončí poruchou výrobku a nemáme tedy údaj o době do poruchy, ale víme, jak dlouho výrobek pracoval bezchybně. Časové omezení je většinou dané požadavkem na spolehlivost výrobku. Známe tedy dobu, po kterou porucha zkoušeného prvku nevznikla a chceme provést odhad střední doby do poruchy pro celý soubor. Při tom je nutno, zohlednit vlastnosti základního souboru, které vyjadřuje typ jeho rozdělení. [1]

Dolní odhad střední doby do poruchy pro exponenciální rozdělení [1]:

$$\hat{T}_{SD} \geq \frac{2 \cdot \tau_0}{\chi^2_{2v, 1-\alpha}} \quad (4.2)$$

kde:

\hat{T}_{SD} – dolní odhad střední doby do poruchy

τ_0 – doba trvání zkoušky

$\chi^2_{2v, 1-\alpha}$ – hodnota statistiky chí-kvadrát pro 2v stupňů volnosti
a hladinu významnosti α

Počet stupňů volnosti v se spočítá pomocí vzorce [1]:

$$v = r + 1 \quad (4.3)$$

kde:

r – počet poruch (při této zkoušce $r = 0$)

Dolní odhad střední doby do poruchy pro Weibullovo rozdělení [1]:

$$\left(\hat{T}_{SD}\right)^m \geq \frac{2 \cdot \tau_0^m}{\chi^2_{2v, 1-\alpha}} \quad (4.4)$$

kde:

m – parametr tvaru Weibullova rozdělení

Porovnáním vztahu 4.2 a 4.4 se vztahem 4.1 vidíme, že akumulovaný pracovní čas T_{AKU} je nahrazen dobou trvání zkoušky τ_0 . V případě extrémních zkušebních plánů, kdy je zkoušen pouze jeden výrobek, je součet pracovních dob jednotlivých výrobků nahrazen pracovní dobou pouze jediného výrobku.

Zkouška jediného výrobku do první poruchy

V tomto případě předem neznáme dobu zkoušky, ale s jejím ukončením čekáme na vyskytnutí první poruchy. Vyhodnocení této zkoušky je opět ovlivněno druhem rozdělení základního souboru a lze jej provést pomocí vzorců 4.2 a 4.4, rozdíl je v počtu poruch. Do vzorce 4.3 tedy v tomto případě dosadíme $r = 1$. Díky získání informace o době do poruchy, lze přesněji odhadnout některé hodnoty rozdělení základního souboru.

Poznámka

Pro vyhodnocení zkoušky jediného prvku bez poruchy nebo při jejím návrhu, je vhodné uvažovat nejhorší možnou variantu – takovou, kdy u výrobku dojde k poruše ihned po uplynutí času t (předem stanovená doba zkoušky). Tím získáme dobu do poruchy, jejíž hodnota je doba zkoušky t . Vyhodnotíme tedy zkoušku, stejně jako běžný t-plán, kdy za $r = 1$.

Další možností je, například v případě motoru, celý výrobek po zkoušce rozebrat, zjistit opotřebení a odhadnout zbytkovou životnost.

Při použití extrémních případů zkoušek je u ostatních výrobků z výrobní série očekáváno podobné chování, což ale zpětně klade nároky na výrobu, tedy aby kvalita výrobků příliš nekolísala.

5 Zrychlené zkoušky spolehlivosti

Jak již bylo zmíněno výše, tyto zkoušky nám umožňují zkrátit dobu zkoušky oproti očekávané životnosti výrobku.

5.1 Druhy zrychlených zkoušek

Zrychlené zkoušky můžeme dělit podle jejich účelu na [5]:

- kvalitativní,
- kvantitativní.

5.1.1 Kvalitativní zrychlené zkoušky

Zkoušený vzorek je různě zatěžován a buď dojde k jeho porušení nebo naopak testem projde. Provádí se spíše za účelem zjištění nejčastějšího druhu poruchy a k odhalení slabých míst výrobku. Tato zkouška se většinou nepoužívá k zjištění jeho životnosti. Může se provádět před kvantitativními zrychlenými zkouškami, abychom zjistili jakým způsobem a zatížením zkoušený výrobek namáhat v následujících zkouškách. [5]

5.1.2 Kvantitativní zrychlené zkoušky

Tyto zkoušky nám umožňují zjistit konkrétní data týkající se životnosti výrobku a budou rozebrány v dalších kapitolách.

5.2 Způsoby zrychlení zkoušek [5]

- zrychlení větším využitím,
- zrychlení přetížením.

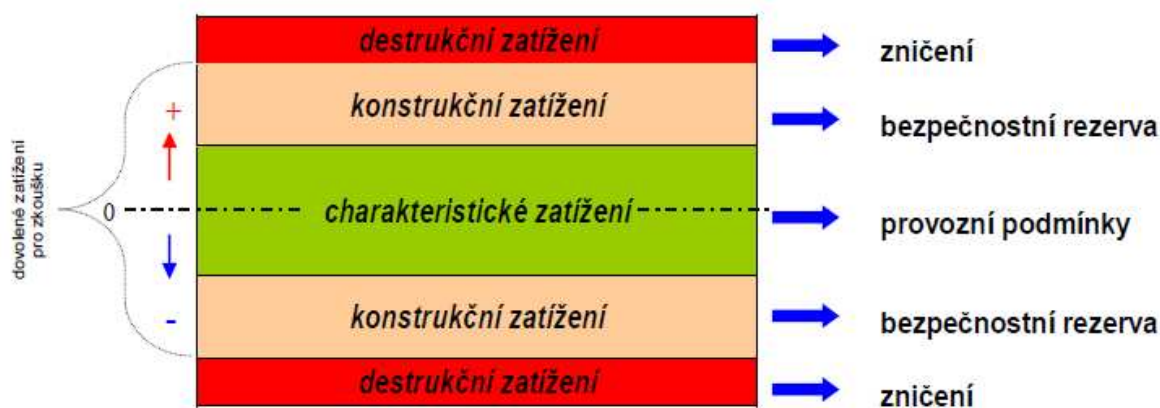
5.2.1 Zrychlení větším využitím [5]

Tento způsob lze použít u výrobků, které nepracují nepřetržitě. Rychlejší degradace, a tím i zkrácení zkoušky oproti reálnému použití, dosáhneme nepřetržitým provozem. Zrychlení zkoušky závisí na podílu celkové doby provozu a doby provozu zkoumaného výrobku. Toto zrychlení tedy může být poměrně velké, pokud je výrobek v provozu méně často a po krátkou dobu nebo naopak malé, pokud je v provozu téměř po celou dobu práce

systému, jehož je součástí. Tento poměr je také důležitý pro přepočtení parametrů zjištěných zrychlenou zkouškou na parametry očekávané při provozním zatížení. [1] [11]

5.2.2 Zrychlení přetížením

Pro ostatní druhy výrobků, u kterých je očekávaná životnost neúměrně velká nebo pracují nepřetržitě, lze zkoušku zrychlit zvětšením zatížení oproti provoznímu zatížení. Urychlí se tak přirozená degradace výrobku, nesmí však dojít k jeho zničení vlivem destrukčního zatížení. Přetížení prvku může vést k jeho neúměrnému zahřívání a náhlému zničení například roztavením a tomu musíme zabránit. Jak ukazuje obrázek 5.1, musíme zatížení udržovat v pásmu konstrukčního zatížení. [1]



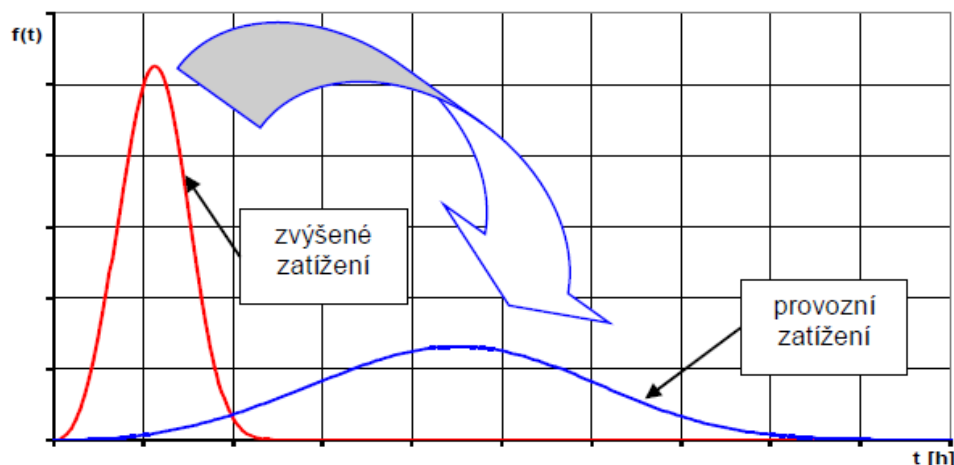
Obr. č. 5.1: Zkušební zatížení

Zdroj: [3]

Zrychlení zkoušky můžeme docílit prováděním při nízké nebo vysoké teplotě, vibracemi, zvýšením vlhkosti, napětí, tlaku atd. a případně tato zatížení kombinovat. I průběh zatížení se během zkoušky může měnit. Z hlediska správného vyhodnocení testu je důležité zvolit velikost, způsob a průběh přídatného zatížení tak, aby se zrychlil proces vzniku těch poruch, které se v provozu vyskytují nejčastěji. Je tedy nutná určitá znalost konstrukce prvku a zkušenosti s jeho provozem. Při zvyšujícím se přídatném zatížení se zkracuje doba zkoušky, ale může zároveň narůstat i nejistota zjištěných dat. [1] [5]

Tento druh zkoušky může sloužit k získání informací o spolehlivosti výrobku, tedy k zjištění průběhu a konkrétních parametrů rozdělení pravděpodobnosti dob do poruchy. Při zvýšeném zatížení však dostáváme jiný průběh hustoty pravděpodobnosti $f(t)$ v závislosti na čase t [h] viz. obrázek č. 5.2, a tedy i jinou střední hodnotu. Mezi charakteristikami zjištěnými při zrychlené zkoušce a provozními charakteristikami se ovšem dá očekávat závislost, která je charakterizována právě způsobem, velikostí a

průběhem přídatného zatížení. Díky této znalosti můžeme takto získaná data extrapolovat pro provozní podmínky. [5]



Obr. č. 5.2: Zkušební zatížení

Zdroj: [3]

5.3 Modely zrychlených zkoušek přetížením

Tyto modely umožňují převod dat získaných ze zrychlených zkoušek na data platná pro běžné provozní podmínky. [1] Pokud tedy známe všechny vstupní údaje modelu, můžeme výsledky měření při jednom zatížení převést na hodnoty očekávané v běžném životě výrobku. Jinak musíme převodní závislost zjišťovat například pomocí měření při různých zatíženích. Modely se liší podle závislosti spolehlivostních parametrů na zatížení, viz. podklady [1] [5]:

- Arrheinův model,
- Eyringův model,
- model inverzní mocninné křivky,
- teplotně-netepelný model,
- teplotně vlhkostní model,
- model více proměnných,
- model časově proměnného zatížení.

Některým z nich se budu věnovat v následujících kapitolách.

5.3.1 Arrheinův model

Tento model vychází z Arrheinovy rovnice rychlosti reakce [1] [5]:

$$G(T) = A \cdot e^{-\frac{E_A}{K \cdot T}} \quad (5.1)$$

kde:

$G(T)$ – rychlost reakce,

A – netepelná konstanta,

E_A – aktivační energie [eV],

K – Boltzmanova konstanta ($8,617385 \cdot 10^{-5} \text{ ev.K}^{-1}$),

T – absolutní teplota [K].

Tato rovnice vyjadřuje závislost rychlosti reakce na teplotě a aktivační energii. Arrheinův model, který popisuje rovnice 5.2, je jakousi analogií a je tedy vhodný pro zkoušky, kde zrychlující faktor má teplotní charakter. Tento model je formulován za předpokladu, že doba života je úměrná obrácené hodnotě rychlosti reakce v procesu [1]:

$$L(T) = C \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (5.2)$$

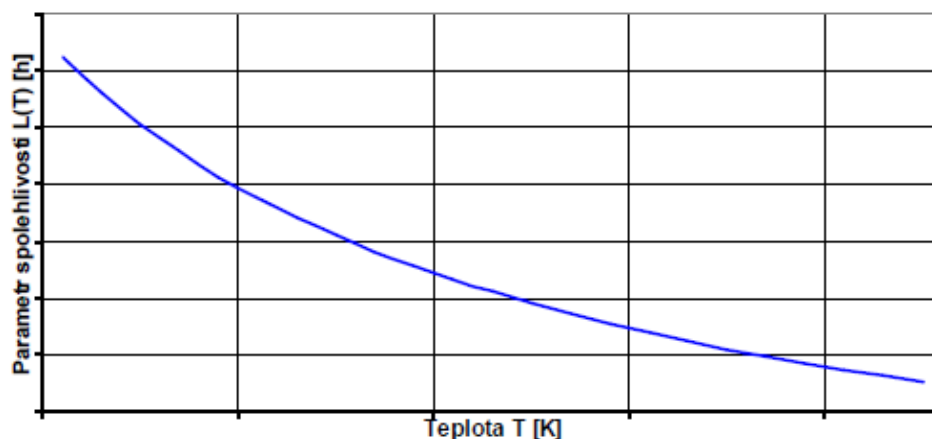
kde:

$L(T)$ – kvantitativní ukazatel spolehlivosti, např. střední hodnota, medián,

T – úroveň zatížení (absolutní teplota [K]),

C, B – parametry modelu.

Následující obrázek č. 5.3 vyjadřuje závislost parametru spolehlivosti na teplotě (parametry modelu C, B jsou konstantní).



Obr. č. 5.3: Závislost parametru spolehlivosti na teplotě

Zdroj: [3]

Pokud je přídatné zatížení výlučně tepelné, lze parametr modelu B určit takto [1]:

$$B = \frac{E_A}{K} \quad (5.3)$$

kde:

E_A – aktivační energie [eV],

K – Boltzmanova konstanta ($8,617385 \cdot 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$)

Kolikrát je zkouška větším zatížením rychlejší, uvádí faktor zrychlení. Lze ho vyjádřit jako poměr jednoho spolehlivostního parametru zjištěného při běžném provozu a při zrychlené zkoušce [1]:

$$A_F = \frac{L_U}{L_A} = \frac{C \cdot e^{\frac{B}{T_U}}}{C \cdot e^{\frac{B}{T_A}}} = e^{B \left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_A} \right)} \quad (5.4)$$

kde:

A_F – faktor zrychlení,

L_U – hodnota ukazatele spolehlivosti při provozním zatížení,

L_A – hodnota ukazatele spolehlivosti při zvýšeném zatížení,

T_U – úroveň zatížení při provozních podmínkách (absolutní teplota [K]),

T_A – zvýšená úroveň zatížení při zkoušce (absolutní teplota [K]),

C, B – parametry modelu.

Stejný poměr platí i pro ostatní hodnoty a parametry. Známe-li tedy faktor zrychlení, můžeme přepočítat libovolné parametry. Z předchozí rovnice je patrné, že pro jeho zjištění není třeba znát parametr modelu C , ale je třeba znát parametr B nebo aktivační energii. Protože zjištění aktivační energie je zvláště pro složité výrobky velmi náročné, zjišťuje se zkouškami stejných výrobků při různých teplotách přímo hodnota parametru B .

5.3.2 Eyringův model

Eyringův model vychází z principů kvantové mechaniky. Nejčastěji se používá, je-li přídatné zatížení tepelné, ale na rozdíl od Arrheinova modelu je tento vztah univerzálnější a hodí se například i pro namáhání zvýšenou vlhkostí. Zjišťovaný ukazatel spolehlivosti je v tomto případě popsán [1] [5]:

$$L(V) = \frac{1}{V} \cdot e^{-\left(A - \frac{B}{V}\right)} \quad (5.5)$$

kde:

$L(V)$ – kvantitativní ukazatel spolehlivosti, např. střední hodnota, medián,

V – velikost zatížení,

A, B – parametry modelu.

5.3.3 Model inverzní mocninné křivky

Pokud lze dobu života výrobku nebo jiný ukazatel spolehlivosti vyjádřit jako nepřímou mocninnou závislost na zatížení, můžeme použít vztah [1]:

$$L(V) = \frac{1}{K \cdot V^n} \quad (5.6)$$

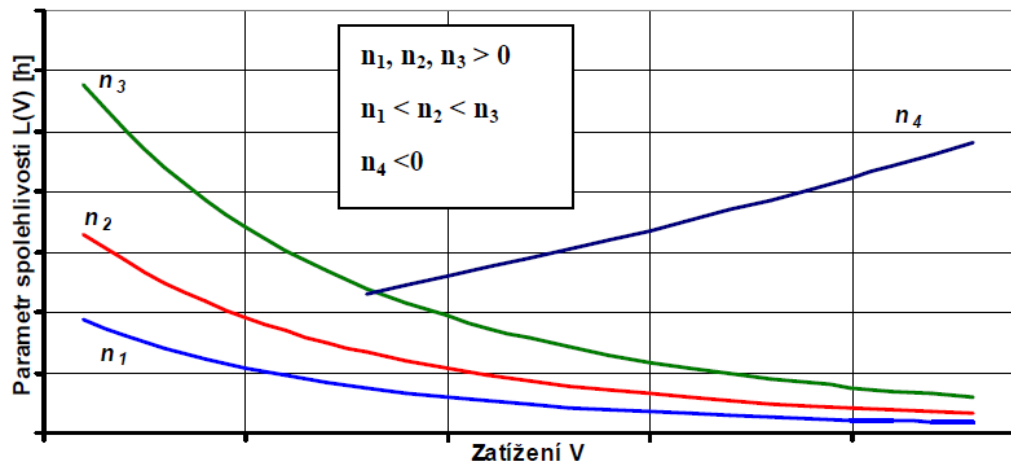
kde:

$L(V)$ – kvantitativní ukazatel spolehlivosti, např. střední hodnota, medián,

V – úroveň zatížení

K, n – parametry modelu

Velikost parametru n představuje vliv zatížení V na kvantitativní ukazatel spolehlivosti $L(V)$, tedy se vzrůstajícím zatížením V kvantitativní ukazatel spolehlivosti $L(V)$ klesá nebo může i růst. Velká hodnota parametru n se dá očekávat, pokud je zkoumaný výrobek na dané zatížení velmi citlivý a naopak malá hodnota parametru n ukazuje na malou citlivost. Můžeme uvažovat i extrémní případ kdy $n = 0$ a zkoumaný kvantitativní ukazatel je závislý pouze na parametru K (dané zatížení tedy nemá vliv na spolehlivost). Je-li n záporné, pak spolehlivost výrobku se zvyšováním zatížení dokonce roste. Závislost parametru spolehlivosti a zatížení na velikosti parametru n ukazuje obr. č. 5.4. [1]



Obr. č. 5.4: Model inverzní mocninné křivky

Zdroj: [3]

Faktor zrychlení pro tento model lze spočítat [1]:

$$A_F = \frac{L_U}{L_A} = \frac{K \cdot V_A^n}{K \cdot V_U^n} = \left(\frac{V_A}{V_U} \right)^n \quad (5.7)$$

kde:

A_F – faktor zrychlení,

L_U – hodnota ukazatele spolehlivosti při provozním zatížení,

L_A – hodnota ukazatele spolehlivosti při zvýšeném zatížení,

V_U – úroveň zatížení při provozních podmínkách,

V_A – zvýšená úroveň zatížení,

K, n – parametry modelu.

5.3.4 Teplotně-netepečný model

Jak již bylo zmíněno výše, ke zrychlení zkoušek lze použít různé kombinace přídavného namáhání. Tento model postihuje případ, kdy je jedno namáhání tepelné a druhé ne. Vztah je tak složen z Arrheinova modelu a modelu inverzní mocninné křivky [1]:

$$L(U, T) = \frac{C}{U^n \cdot e^{\frac{B}{T}}} \quad (5.8)$$

kde:

$L(U, T)$ – kvantitativní ukazatel spolehlivosti, např. střední hodnota, medián,

U – netepečné zatížení,

T – absolutní teplota [K],

B, C, n – parametry modelu.

Parametr B vyjadřuje citlivost výrobku na tepelné zatížení. S růstem jeho hodnoty stoupá závislost doby života na teplotě. Parametr n představuje, stejně jako v modelu inverzní mocninné křivky, vliv netepečného zatížení na dobu života výrobku [1].

Faktor zrychlení pro tento model lze spočítat:

$$A_F = \frac{L_U}{L_A} = \left(\frac{U_A}{U_U} \right)^n \cdot e^{B \left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_A} \right)} \quad (5.9)$$

kde:

A_F – faktor zrychlení,

L_U – hodnota ukazatele spolehlivosti při provozním zatížení,

L_A – hodnota ukazatele spolehlivosti při zvýšeném zatížení,

T_U – teplota při provozních podmínkách [K],

T_A – teplota při zrychlené zkoušce [K],

U_U – úroveň netepečného zatížení při provozních podmínkách,

U_A – úroveň netepečného zatížení při zkoušce,

B, n – parametry modelu.

5.3.5 Model časově proměnného zatížení

Dalším způsobem jak urychlit zkoušku spolehlivosti, je použití časově proměnného zatížení. Můžeme tedy například postupně zvyšovat teplotu, nebo elektrické napětí zkoušeného výrobku.

Jako praktický příklad lze uvést testování kapalinou chlazených motorů termošoky. Po záběhu motor ohřejeme zatížením na maximální výkon, pak jej zastavíme, vypustíme chladicí kapalinu a naplníme ho novou studenou chladicí kapalinou a opět zahřejeme. Tento postup se opakuje do uplynutí požadovaného počtu cyklů (několik tisíc) nebo do poruchy. [8]

6 Vlivy působící na opotřebení součástí

Jak vyplývá z výše uvedeného, existuje více možností urychlení zkoušky spolehlivosti. Důležité ale je zvolit takové přídavné zatížení, které je blízké provoznímu a vede tedy ke vzniku, v provozu se nejčastěji vyskytujících, poruch. Z tohoto důvodu je nutné poznat zatížení nebo vlivy působící při běžném provozu dané součásti nebo celku.

6.1 Elektronika

V moderních vozidlech, a to i těch závodních, je použití elektroniky velmi rozšířené. Má vliv na správnou funkci jednotlivých částí vozidla, umožňuje jejich rychlé nastavení, zjednodušuje ovládání vozu, diagnostiku atd. Nicméně s jejím rozšířením a složitostí, roste i pravděpodobnost poruchy.

Na spolehlivost automobilové elektroniky v provozu negativně působí zejména [10]:

- vysoké teploty - v elektronice jsou používány různé materiály s různou tepelnou roztažností a tím může při změně teploty docházet k pnutí. K tomu také může dojít při nestejnoměrném ohřevu výrobku [10]. Při vysoké teplotě také dochází k chemickým změnám u polovodičů.
- nízké teploty – podobně, jako v případě vysoké teploty, může dojít k pnutí v materiálu. Při poklesu teploty také může dojít ke kondenzaci vody (rosení), která může snižovat izolační schopnosti výrobku a může způsobovat korozi [10].
- rychlé střídání teplot – opět může způsobit značné pnutí v materiálu a kondenzaci vody [10],
- vlhkost – vysoká vlhkost má vliv na izolační schopnosti výrobku, způsobuje korozi u kovových materiálů a u plastů bobtnání. Při nízké vlhkosti může naopak docházet k vysychání např. elektrolytu [10].
- prach – usazuje se na chladičích a tím snižuje jejich výkon, což vede ke zvýšení teploty prvku [10].

„Teplota vzduchu a její změny představují jeden z hlavních činitelů ovlivňujících bezporuchovou činnost elektrických zařízení.“ [10] Toto tvrzení potvrzuje i současný

trend v elektronice, kdy se k zrychlení zkoušek běžně používá zvýšená teplota. Pro tento případ je vhodný Arrheinův model.

Dalšího zrychlení zkoušky můžeme dosáhnout kombinací tepelného namáhání a zvýšeného elektrického napětí. Pro řešení takovéto zkoušky se hodí teplotně-netepelný model.

6.2 Motor

Zejména na mechanické části motoru má velký vliv:

- Teplotní režim - vnitřní plochy motorů jsou vyráběny s velkou přesností. To umožňuje zlepšit účinnost, ale zvětšuje nároky na dodržení provozní teploty. Vysoká teplota má také vliv na degradaci olejové náplně motoru.
- Otáčky - pokud je motor provozován ve vysokých otáčkách vede to k jeho rychlejšímu opotřebení.
- Zatížení - životnost rovněž klesá u motorů, které jsou neustále provozovány pod velkým zatížením.

U závodních motorů se předpokládá práce ve vysokých otáčkách s využitím maximálního výkonu. Vlivem charakteristiky tratě bývá toto zatížení krátkodobé a střídá jej zpomalování, které umožňuje snížit zatížení motoru díky tomu, že není namáhán expansními tlaky při hoření. “Životnostní zkoušky při maximálním výkonu se neprovádějí, neboť se jimi rychle ničí drahý motor“ [7]. Toto jsou důležité poznatky z práce závodních motorů, které je dobré si uvědomit při tvorbě a výběru matematických modelů. [7]

6.3 Převodovka

Převodovky v závodních automobilech jsou různé, některé se prakticky neliší od těch, které se montují do sériových vozidel, jiné jsou speciálně pro tento účel konstruované. Přesto jsou na ně kladeny stejné požadavky:

- Větší namáhání: o kolik se zvýší výkon a točivý moment motoru při závodních úpravách, o tolik se zvýší také namáhání převodovky. I když zde, stejně jako u motoru, očekáváme, že maximální zatížení nebude dlouhodobé, přesto bude plný výkon využíván častěji, než tomu bývá u automobilů v běžném silničním provozu. Proto i při použití sériového motoru bude očekávaná životnost nižší. V naprosté

většině případů je však použita převodovka jiná než sériová a je dimenzována pro zvýšené namáhání.

- Co nejkratší doba nutná ke změně rychlostního stupně. U závodních automobilů se nejčastěji užívají stupňové převodovky. Při každém přeřazení tedy dojde ke skokové změně přenášeného točivého momentu a tato změna musí proběhnout během zlomku sekundy, což představuje rázové zatížení převodovky a právě toto zatížení bývá často kritické.

Závodní převodovky mívají přímé ozubení, speciální řadící systém a v některých kategoriích mohou být i sekvenční. Sekvenční převodovky umožňují rychlejší změnu převodového stupně. Přeřazování probíhá postupně, po jednom rychlostním stupni, buď nahoru nebo dolů. Dále sekvenční převodovka umožňuje řazení bez spojky. Aby však bylo možné vyřadit, je nutné snížit točivý moment na vstupu. K tomu účelu slouží spínač na řadící páce nebo přímo na převodovce. Při aktivaci spínače je vyslán signál do řídicí jednotky motoru, která zajistí přerušování dodávky paliva a případně i odstavení zapalování. Největší rozdíl je však v samotném mechanismu řazení. Řadící vidlice jsou ovládány pomocí drážek ve speciálním válci. Otáčením válce dochází k přeřazování mezi jednotlivými rychlostními stupni. Pohyb válce je přes pákový mechanismus odvozen od pohybu řadící páky, případně pomocí hydrauliky od ovládačů pod volantem. K bezchybné a rychlé změně rychlostních stupňů je tedy nutná bezchybná práce celého řadícího mechanismu, který je poměrně složitý a k jehož opotřebení dochází právě při řazení. [6]

Závodní převodovky bývají vybaveny elektronickou řídicí jednotkou. Tato umožňuje naprogramovat a zaznamenat množství parametrů a dat. Například umožňuje nastavení doby snížení točivého momentu pro jednotlivé rychlostní stupně, nastavení citlivosti ovládání, ukládají se do ní údaje o řazení jako nejpoužívanější rychlostní stupeň, počet řazení atd. Získaná data můžeme později využít právě při návrhu zkoušek spolehlivosti. [6]

Jako vhodná veličina, ukazující stav převodovky, se jeví počet řazení.

7 Aplikace zrychlených zkoušek

Tato kapitola se snaží najít vazby mezi spolehlivostí různých částí závodního automobilu a některými vlivy na ni působícími pomocí matematických modelů. Využívá tedy poznatků zmíněných v předchozích kapitolách. Při zjišťování parametrů spolehlivosti vozidla se většinou vychází z jednoho ze dvou parametrů:

- čas – jak dlouho je průměrný výrobek schopen bezporuchového provozu,
- vzdálenost – kolik km je v průměru schopen ujet do poruchy.

Sloučením těchto dvou parametrů může vzniknout třetí a tím je průměrná rychlost na trati. Při tvorbě modelu lze tento parametr považovat za jednu z konstant ovlivňujících zatížení.

Tento parametr musí v první řadě vhodně popisovat průběh života prvku, proto se používají i jiné, jako je například počet řazení, zmíněný v kapitole 6.3.

7.1 Elektronika

Závodní vozidla a jejich komponenty jsou vyráběny pouze v malých sériích, proto je jejich cena vyšší ve srovnání s velkosériovými výrobky. Z tohoto důvodu je vhodné použití extrémních případů zkoušek, při kterých je testován pouze jeden výrobek. Pro elektroniku je vhodné exponenciální rozdělení.

Nejprve uvedu parametry běžných, nezkrácených zkoušek, protože zkrácené zkoušky z nich vychází.

Dolní odhad střední doby do poruchy se vypočítá ze vzorce 4.2. V tomto případě známe z výsledků zkoušky τ_0 a to představuje buď dobu při které vznikla porucha (r-plán), nebo dobu při které byla zkouška ukončena bez vzniku poruchy (t-plán). Pro zjednodušení je vhodné vzorec upravit do této podoby (znaménko větší nebo rovno nahradit rovná se):

$$\hat{T}_{SD} = \frac{2 \cdot \tau_0}{\chi^2_{2v, 1-\alpha}} \quad (7.1)$$

kde:

\hat{T}_{SD} – dolní odhad střední doby do poruchy

τ_0 – doba trvání zkoušky

$\chi^2_{2v, 1-\alpha}$ – hodnota statistiky chí-kvadrát pro 2v stupňů volnosti
a hladinu významnosti α

Důležitou hodnotou je také počet poruch r , který přímo ovlivňuje počet stupňů volnosti v . Tato závislost je uvedena ve vzorci 4.3. Platí, že se zvětšujícím se počtem poruch roste i hodnota rozdělení chí-kvadrát $\chi^2_{2v, 1-\alpha}$ a tím klesá dolní odhad střední doby do poruchy. Pro t-plán, kdy je počet poruch roven nule, je vhodné i přesto počítat se vznikem jedné poruchy. Díky tomu je možné zahrnout případ, kdy by došlo těsně po uplynutí zkušební doby k poruše (došlo by ke skokovému poklesu dolního odhadu střední doby do poruchy).

Při tvorbě zkoušky, tedy výpočtu doby jejího trvání, je znám dolní odhad střední doby do poruchy \hat{T}_{SD} , to je požadavek kladený na spolehlivost dané součásti. Neznámou je tedy τ_0 . V tomto případě je také vhodné počítat se vznikem jedné poruchy. Vzorec tedy vypadá takto:

$$\tau_0 = \frac{\hat{T}_{SD} \cdot \chi^2_{2v, 1-\alpha}}{2} \quad (7.2)$$

kde:

\hat{T}_{SD} – dolní odhad střední doby do poruchy

τ_0 – doba trvání zkoušky

$\chi^2_{2v, 1-\alpha}$ – hodnota statistiky chí-kvadrát pro 2v stupňů volnosti
a hladinu významnosti α

Při aplikaci zrychlených zkoušek se změní doba zkoušky a tu lze vyjádřit, v případě přídatného tepelného zatížení, používaného pro tyto části, z Arrheinova modelu rovnice 5.2.

$${}^A\hat{T}_{SD} = C \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (7.3)$$

$${}^A\tau_0 = C \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (7.4)$$

kde:

${}^A\hat{T}_{SD}$ – dolní odhad střední doby do poruchy pro zrychlenou zkoušku

${}^A\tau_0$ – doba trvání zkoušky pro zrychlenou zkoušku

T – úroveň zatížení (absolutní teplota [K])

C, B – parametry modelu, je třeba určit

Ke správnému vyhodnocení a tvorbě zkoušky je nutné přepočítat hodnoty získané zkrácenou zkouškou na hodnoty pro běžnou zkoušku. K tomu slouží faktor zrychlení:

$$A_F = \frac{\tau_0}{{}^A\tau_0}, \quad (7.5)$$

$$A_F = \frac{\hat{T}_{SD}}{{}^A\hat{T}_{SD}} \quad (7.6)$$

kde:

${}^A\hat{T}_{SD}$ – dolní odhad střední doby do poruchy pro zrychlenou zkoušku

${}^A\tau_0$ – doba trvání zkoušky pro zrychlenou zkoušku

\hat{T}_{SD} – dolní odhad střední doby do poruchy

τ_0 – doba trvání běžné zkoušky

A_F – faktor zrychlení

Dosazením těchto hodnot do vzorce 4.1 tedy dostaneme rovnici pro vyhodnocení zrychlené zkoušky:

$${}^A\hat{T}_{SD} = \frac{2 \cdot {}^A\tau_0}{\chi^2_{2v, 1-\alpha}} \quad (7.7)$$

$${}^A\hat{T}_{SD} = \frac{\hat{T}_{SD}}{A_F} \quad (7.8)$$

$$\frac{\hat{T}_{SD}}{A_F} = \frac{2 \cdot {}^A\tau_0}{\chi_{2v,1-\alpha}^2} \quad (7.9)$$

$$\hat{T}_{SD} = A_F \cdot \frac{2 \cdot {}^A\tau_0}{\chi_{2v,1-\alpha}^2} \quad (7.10)$$

Pro návrh zkoušky, tedy stanovení doby jejího trvání, postupujeme analogicky:

$${}^A\tau_0 = \frac{{}^A\hat{T}_{SD} \cdot \chi_{2v,1-\alpha}^2}{2} \quad (7.11)$$

$${}^A\hat{T}_{SD} = \frac{\hat{T}_{SD}}{A_F} \quad (7.12)$$

$${}^A\tau_0 = \frac{\frac{\hat{T}_{SD}}{A_F} \cdot \chi_{2v,1-\alpha}^2}{2} \quad (7.13)$$

$${}^A\tau_0 = \frac{\hat{T}_{SD} \cdot \chi_{2v,1-\alpha}^2}{2 \cdot A_F} \quad (7.14)$$

Z uvedených rovnic je patrné, že je nutné znát faktor zrychlení, který lze vyjádřit podle vzorce 5.4 takto:

$$A_F = e^{B \left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_A} \right)} \quad (7.15)$$

Faktor zrychlení je tedy závislý na teplotě a konstantě B . Z tohoto vyjádření je jasné, že hodnota této konstanty nezávisí na teplotě, ale je jakousi charakteristikou daného prvku. Když je její hodnota známa, lze ji použít při různých zkouškách shodných prvků. Jak bylo uvedeno dříve, lze její hodnotu zjistit při měření životnosti při různých zatíženích. Dále je uvedeno odvození rovnice umožňující zjištění konstanty B , právě z těchto měření.

$$\frac{2 \cdot \tau_0}{\chi_{2v,1-\alpha}^2} = C \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (7.16)$$

$$A_F = \frac{C \cdot e^{\frac{B}{T_U}}}{C \cdot e^{\frac{B}{T_A}}} \quad (7.17)$$

$$A_F = e^{B \cdot \left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_A} \right)} \quad (7.18)$$

$$\ln A_F = \ln e^{B \cdot \left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_A} \right)} \quad (7.19)$$

$$\ln A_F = B \cdot \left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_A} \right) \ln e \quad (7.20)$$

$$\ln A_F = B \cdot \left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_A} \right) \quad (7.21)$$

$$B = \frac{\ln A_F}{\left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_A} \right)} \quad (7.22)$$

$$A_F = \frac{C \cdot e^{\frac{B}{T_U}}}{C \cdot e^{\frac{B}{T_A}}} = \frac{\frac{2 \cdot \tau_U}{\chi_{2v,1-\alpha}^2}}{\frac{2 \cdot \tau_A}{\chi_{2v,1-\alpha}^2}} = \frac{\tau_U}{\tau_A} \quad (7.23)$$

$$B = \frac{\ln \frac{\tau_U}{\tau_A}}{\left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_A} \right)} \quad (7.24)$$

kde:

A_F – faktor zrychlení

τ_A – doba zkoušky při teplotě T_A

τ_U – doba zkoušky při teplotě T_U

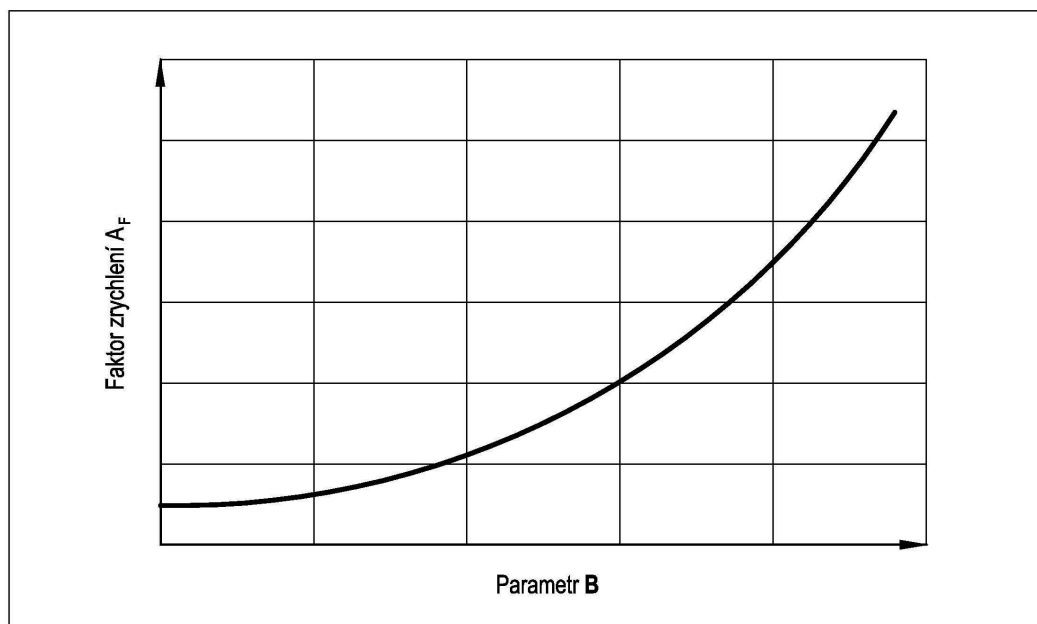
T_A – teplota při první zkoušce [K]

T_U – teplota při druhé zkoušce [K]

B, C – parametry modelu

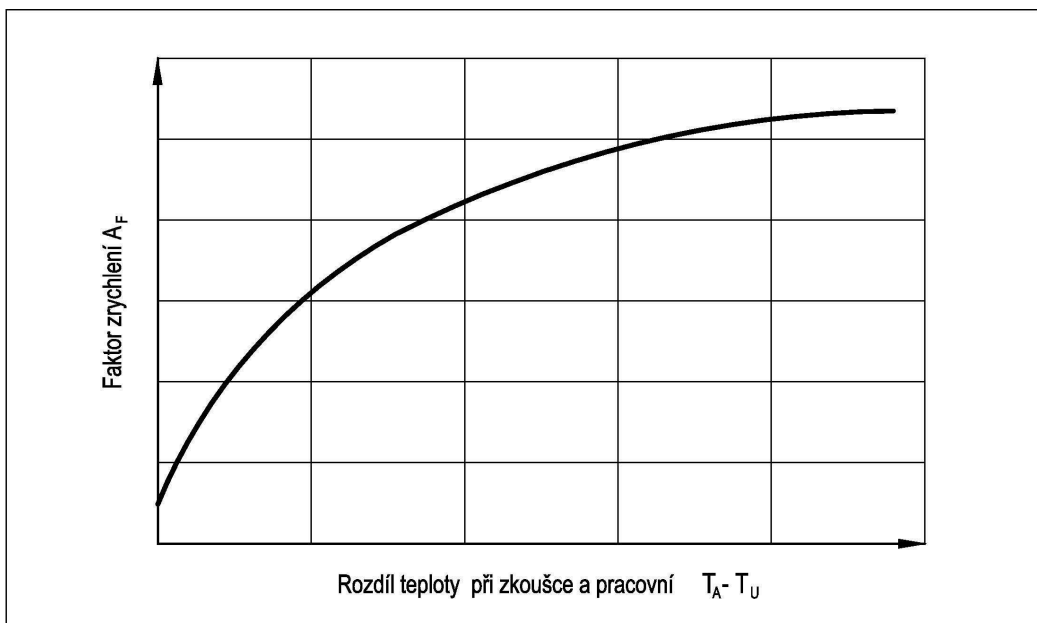
$\chi_{2v,1-\alpha}^2$ – hodnota statistiky chí-kvadrát pro 2v stupňů volnosti
a hladinu významnosti α

Doba trvání zkoušky může být vyjádřena v kilometrech, ale v případě elektroniky je vhodnější spolehlivost vztahovat na dobu provozu. Ze vzorce 7.18 je vidět, že s rostoucí hodnotou parametru B roste i faktor zrychlení a to exponenciálně, viz graf 7.1.



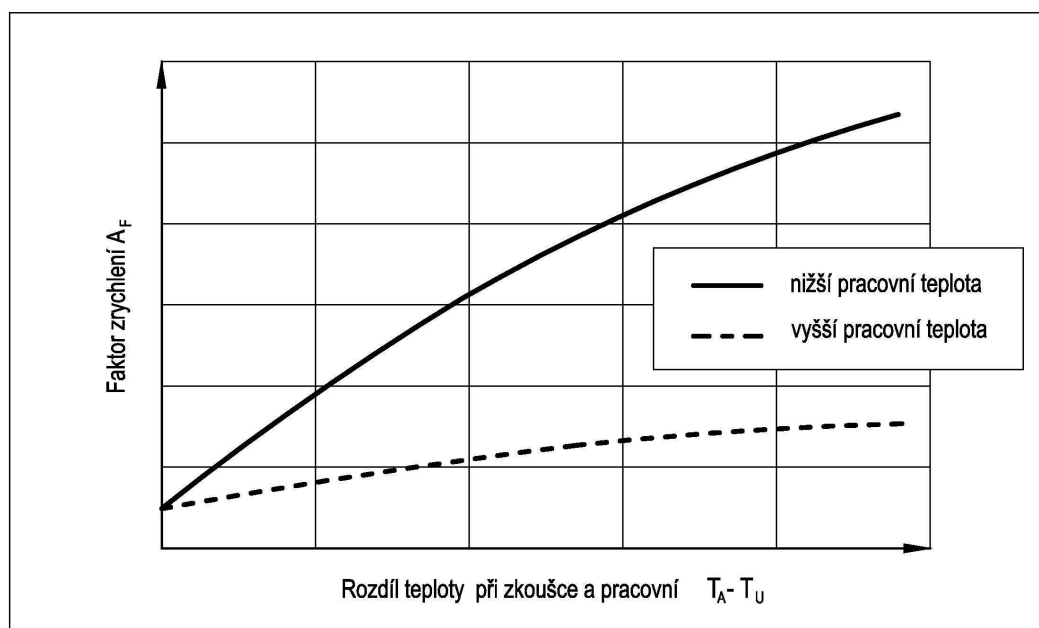
Graf 7.1: Závislost faktoru zrychlení na parametru B

Jak je patrné již ze vzorce, závislost rozdílu teplot při různém zatížení a faktoru zrychlení není lineární. Faktor zrychlení je citlivý už na malé rozdíly teplot a naopak při větších rozdílech je jeho růst pozvolnější viz graf 7.2. Znamená to tedy, že již malé zvýšení pracovní teploty má vliv na životnost výrobku.



Graf 7.2: Závislost faktoru zrychlení na rozdílu teplot pracovní a při zkoušce

Na růst faktoru zrychlení má vliv i pracovní teplota výrobku. Z grafu 7.3 je patrný předpoklad, že výrobky navržené na vyšší pracovní teploty (například lambda sonda, teplotní čidla atd.) jsou méně citlivé na zvýšenou teplotu.



Graf 7.3: Vliv teploty na faktor zrychlení

Návrh zkoušky životnosti

Výše uvedený vzorec 7.1 lze použít pro zjišťování životnosti. Jak bylo uvedeno na začátku této práce, je u závodních automobilů očekávána co nejvyšší možná spolehlivost, a proto je vhodné ji ověřovat zkouškami. Provoz závodního automobilu má však svou charakteristiku, která je odlišná od běžného provozu. Aby zkoušky byly co nejpřesnější, je třeba co nejlépe napodobit provoz výrobku. Ten se skládá zejména ze tří částí:

- Závod: elektronika je plně zatěžována – je pod napětím, které se regulátor snaží udržet na konstantní hladině, zatížení ostatních elektronických součástí se pak liší zejména podle jejich účelu. Mohou být namáhány vysokou teplotou, chemickými vlivy, otřesy atd., ale nejčastěji jsou tato zatížení kombinována.
- Přejezd: v tomto režimu bývají otáčky a výkon motoru omezeny – nicméně podmínky, při kterých elektronika pracuje, jsou velmi podobné závodu.
- Uskladnění automobilu: v tomto případě samozřejmě záleží na podmínkách uskladnění. Pro uváděný příklad předpokládejme konstantní teplotu a nulové napětí nebo nižší napětí. Prudké střídání teplot, stejně jako extrémní mrazy a vedra dále negativně ovlivňují životnost výrobku, jak je uvedeno v kapitole 6.1.

U čidel, určených k snímání různých veličin kapalin a plynů, předpokládáme netečnost vůči těmto látkám, zaručenou výrobcem. Pokud je třeba ji ověřovat, provedeme to speciální zkouškou, například ponořením čidla do kapaliny s měřením jeho výstupu a zkoumáním změny povrchu. I tyto zkoušky lze zrychlit změnou teploty nebo tepelnými šoky. Pokud se jedná o otřesy, tedy mechanické namáhání, je nutné jejich umělé vytváření při zkoušce, nejedná-li se o zkoušku v provozu. V tomto případě můžeme zrychlení zkoušky docílit i změnou frekvence otřesů.

Pro zjednodušení byl pro příklad vybrán prvek, u kterého není třeba ověřovat odolnost vůči vibracím ani působení chemických látek. Zkouška bude prováděna ve zkušební komoře za zvýšené teploty a podle skutečného provozu. Jedná se tedy o cyklus složený ze dvou stavů:

- práce výrobku pod elektrickým napětím a za zvýšené teploty
- odpočinek výrobku za zvýšené teploty

Dobu, po kterou prvek pracoval bez poruchy, mohu tedy vyjádřit jako součet doby po kterou se výrobek nacházel v obou těchto stavech:

$$\tau_U = \tau_{U1} + \tau_{U2} \quad (7.25)$$

kde:

τ_U – celková doba zkoušky

τ_{U1} – doba trvání zkoušky v prvním stavu

τ_{U2} – doba trvání zkoušky ve druhém stavu

Tento vzorec lze upravit i pro zrychlenou zkoušku:

$$\tau_U = A_{F1} \tau_{A1} + A_{F2} \tau_{A2} \quad (7.26)$$

kde:

τ_U – celková doba zkoušky

τ_{A1} – doba trvání zrychlené zkoušky v prvním stavu

τ_{A2} – doba trvání zrychlené zkoušky ve druhém stavu

Stejně jako běžný život výrobku, je tedy možné i zrychlenou zkoušku rozložit na dvě střídající se období, která se ale liší zatížením a proto mají i jiný faktor zrychlení. Tento

faktor lze pro období, kdy prvek normálně pracuje pod napětím, určit dříve zmíněným měřením životnosti na dvou různých hladinách zatížení.

$$A_{F1} = \frac{\tau_{U1}}{\tau_{A1}} \quad (7.27)$$

$$A_{F2} = \frac{\tau_{U2}}{\tau_{A2}} \quad (7.28)$$

kde:

A_{F1} – faktor zrychlení pro první stav

A_{F2} – faktor zrychlení pro druhý stav

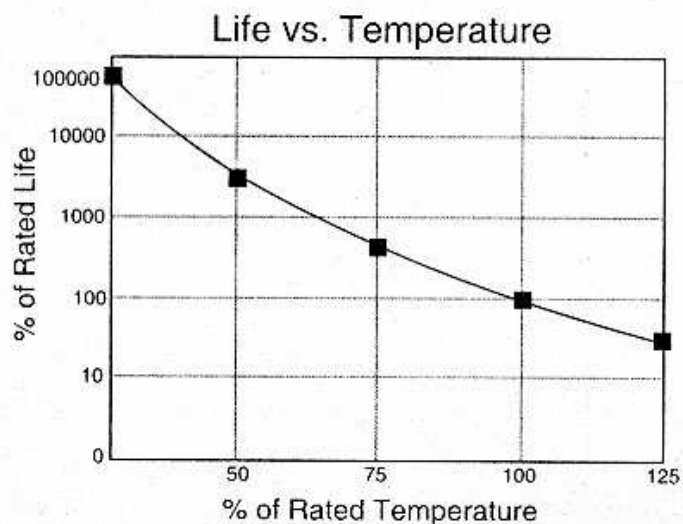
τ_{U1} – doba trvání zkoušky v prvním stavu

τ_{U2} – doba trvání zkoušky ve druhém stavu

τ_{A1} – doba trvání zrychlené zkoušky v prvním stavu

τ_{A2} – doba trvání zrychlené zkoušky ve druhém stavu

Stanovení hodnoty faktoru zrychlení pro druhý stav je náročnější, protože zkoušený výrobek nevykazuje žádnou činnost. Může sice docházet k jeho degradaci, ale případnou poruchu lze zjistit až po zapnutí výrobku. Práce vychází z předpokladu, že doba do poruchy je spojitá náhodná veličina, tedy že k poruše může dojít kdykoliv. Při akceptovatelné míře zkreslení je možné zkoušku realizovat tak, že v určitých intervalech je test přerušen a výrobek přezkoušen. Pokud výrobek vykazuje poruchu, je zkouška ukončena. Čím je předpokládaná doba zkoušky menší, tím častěji musí být výrobek kontrolován. Právě interval kontrol má velký vliv na přesnost výsledku. Ke zjištění faktoru zrychlení bude opět nutno provést dvě zkoušky pod různým zatížením. Pro některé prvky je jejich závislost životnosti na teplotě známa a v takovém případě ji lze například odečíst z grafu. Například graf 7.4 platí pro kondenzátory (% Rated Life – poměrná životnost vůči životnosti při zkoušce, % Rated Temperature – poměrná teplota vůči teplotě při zkoušce).

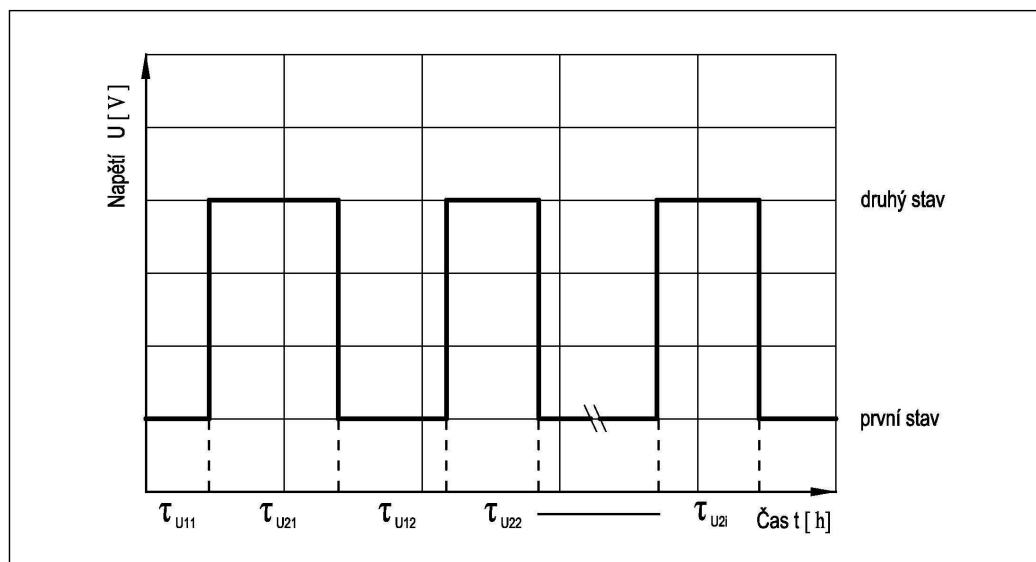


Graf 7.4: Závislost životnosti na teplotě

Zdroj: [9]

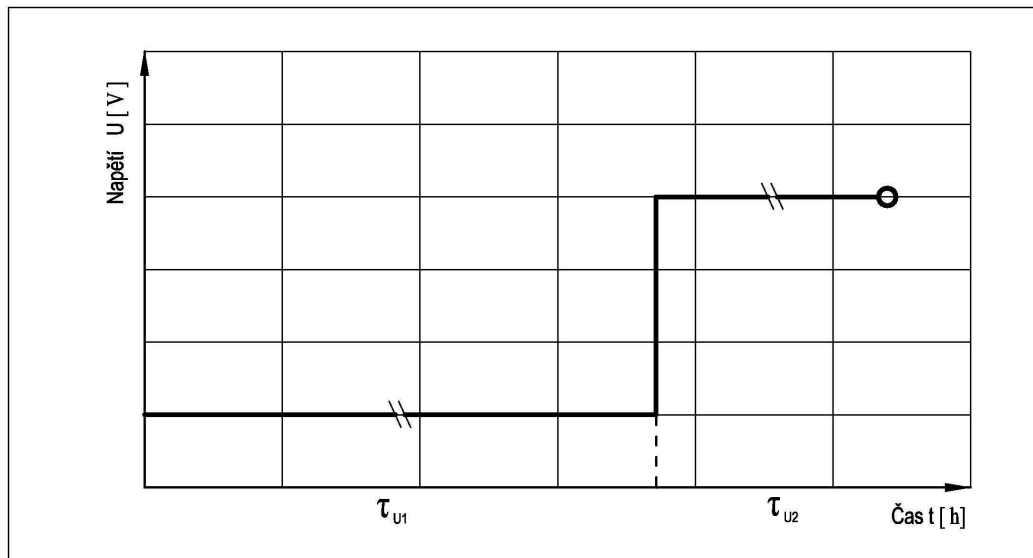
Z provozu máme data týkající se doby, po kterou trvají jednotlivé stavy pro požadovanou délku života. Protože se dva výše zmíněné stavy v průběhu životního cyklu střídají, bude nutné počítat celkový součet pro jednotlivé stavy za období života prvku.

Příklad dat získaných provozem ukazuje graf 7.5:



Graf 7.5: Průběh napětí v závislosti na čase

Tento záznam rozložíme na 2 stavy, jejichž dílčí části sečteme. Horní úroveň napětí v grafu 7.6 odpovídá provoznímu stavu a dolní klidovému režimu – uskladnění automobilu.



Graf 7.6: Stav po sečtení

Matematické vyjádření:

$$\tau_{U1} = \tau_{U11} + \tau_{U12} + \dots + \tau_{U1n} = \sum_{i=1}^n \tau_{U1i} \quad (7.28)$$

$$\tau_{U2} = \tau_{U21} + \tau_{U22} + \dots + \tau_{U2m} = \sum_{i=1}^m \tau_{U2i} \quad (7.29)$$

τ_{U1} – součet dob trvání prvního stavu za cyklus

τ_{U2} – součet dob trvání druhého stavu za cyklus

τ_{U1i} – i-tá část doby trvání prvního stavu

τ_{U2i} – i-tá část doby trvání druhého stavu

n – počet prvních dílčích stavů

m – počet druhých dílčích stavů

Ze vzorců 7.27 a 7.28 lze odvodit vztahy pro stanovení jednotlivých dob zkoušky.

$$\tau_{A1} = \frac{\tau_{U1}}{A_{F1}} \quad (7.30)$$

$$\tau_{A2} = \frac{\tau_{U2}}{A_{F2}} \quad (7.31)$$

kde:

A_{F1} – faktor zrychlení pro první stav

A_{F2} – faktor zrychlení pro druhý stav

τ_{U1} - doba trvání zkoušky v prvním stavu

τ_{U2} - doba trvání zkoušky ve druhém stavu

τ_{A1} – doba trvání zrychlené zkoušky v prvním stavu

τ_{A2} – doba trvání zrychlené zkoušky ve druhém stavu

Doba zkoušky pak už je jen součet těchto dvou časů.

$$\tau_A = \tau_{A1} + \tau_{A2} \quad (7.32)$$

$$\tau_A = \frac{\tau_{U1}}{A_{F1}} + \frac{\tau_{U2}}{A_{F2}} \quad (7.33)$$

τ_A – celková doba zkoušky

Zkouška tedy nakonec vypadá tak, že v první fázi výrobek „odpočívá“ ve zkušební komoře za zvýšené teploty. Tento stav trvá po předem stanovenou dobu. Ve druhé fázi se na něj přivede provozní napětí a zkouška pokračuje. Zjišťuje se, zda výrobek funguje po dobu τ_A bez poruchy. Pořadí fází by mělo být zaměnitelné, ale výše uvedený postup nám umožňuje zjistit poruchu ihned při jejím vzniku – výrobek může být kontrolován průběžně.

Celkový faktor zrychlení A_F je závislý nejen na dílčích faktorech zrychlení, ale i na poměrných dobách jednotlivých fází, lze ho vyjádřit takto:

$$A_F \tau_A = A_{F1} \tau_{A1} + A_{F2} \tau_{A2} \quad (7.34)$$

$$A_F = \frac{A_{F1} \tau_{A1} + A_{F2} \tau_{A2}}{\tau_A} \quad (7.35)$$

kde:

A_F – celkový faktor zrychlení zkoušky

A_{F1} – faktor zrychlení pro první stav

A_{F2} – faktor zrychlení pro druhý stav

τ_{U1} - doba trvání zkoušky v prvním stavu

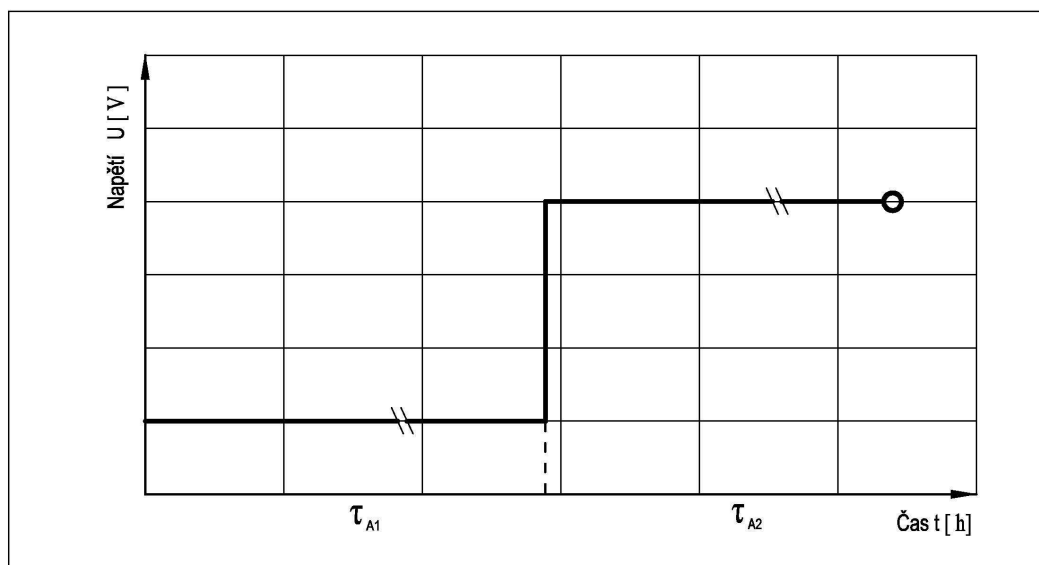
τ_{U2} - doba trvání zkoušky ve druhém stavu

τ_{A1} – doba trvání zrychlené zkoušky v prvním stavu

τ_{A2} – doba trvání zrychlené zkoušky ve druhém stavu

τ_A – celková doba zkoušky

Zkouška se tedy skládá ze dvou t-plánů, které na sebe navazují a liší se napětím. To ukazuje graf 7.7.



Graf 7.7: Průběh zkoušky

Tato zkouška je vhodná jako ověřovací, tedy k ověření skutečnosti, že použitá součástka vydrží bez poruchy stanovený cyklus. Vyhodnocení lze provést stejně jako u extrémních případů zkoušek pomocí vzorce 7.1 kde místo τ_0 dosadíme τ_A , ale nesmíme zapomenout na faktor zrychlení, protože přepočítáváme hodnoty zrychlené zkoušky.

$$\hat{T}_{SD} = A_F \cdot \frac{2 \cdot \tau_A}{\chi_{2v,1-\alpha}^2} \quad (7.36)$$

kde:

\hat{T}_{SD} – požadovaná doba do poruchy

A_F – celkový faktor zrychlení zkoušky

τ_A – celková doba zkoušky

$\chi_{2v,1-\alpha}^2$ – hodnota statistiky chí-kvadrát pro 2v stupňů volnosti

a hladinu významnosti α

Pro výpočet jednotlivých částí zkoušky vzorec upravíme:

$$\tau_{A1} = \frac{\hat{T}_{SD1} \cdot \chi_{2,1-\alpha}^2}{2 \cdot A_{F1}} \quad (7.37)$$

$$\tau_{A2} = \frac{\hat{T}_{SD2} \cdot \chi_{2,1-\alpha}^2}{2 \cdot A_{F2}} \quad (7.38)$$

kde:

A_{F1} – faktor zrychlení pro první stav

A_{F2} – faktor zrychlení pro druhý stav

τ_{U1} - doba trvání zkoušky v prvním stavu

τ_{U2} - doba trvání zkoušky ve druhém stavu

τ_{A1} – doba trvání zrychlené zkoušky v prvním stavu

τ_{A2} – doba trvání zrychlené zkoušky ve druhém stavu

$\chi_{2v,1-\alpha}^2$ – hodnota statistiky chí-kvadrát pro 2v stupňů volnosti

a hladinu významnosti α

Výhodné je provádět zkoušku při jedné teplotě a měnit pouze přiváděné napětí. Doby jednotlivých fází zkoušky pak lze vypočítat takto:

$$\tau_{A1} = \frac{\hat{T}_{SD1} \cdot \chi_{2v,1-\alpha}^2}{2 \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{T_{U1}} - \frac{1}{T_A} \right)}} \quad (7.39)$$

$$\tau_{2A} = \frac{\hat{T}_{SD1} \cdot \chi_{2v,1-\alpha}^2}{2 \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{T_{U2}} - \frac{1}{T_A} \right)}} \quad (7.40)$$

T_A – teplota při zrychlené zkoušce

T_{U1} – obvyklá teplota zkoumaného objektu při prvním režimu

T_{U2} – obvyklá teplota zkoumaného objektu při druhém režimu

B – parametr modelu

\hat{T}_{SD1} – dolní odhad střední doby do poruchy pro první režim

\hat{T}_{SD2} – dolní odhad střední doby do poruchy pro druhý režim

Poznámka

Ve výše uvedeném výpočtu jsou očekávány dvě pracovní teploty. S klesající teplotou stoupá životnost a naopak. Z poznatků uvedených v kapitole 6.1 však vyplývá, že extrémně nízké teploty naopak životnost zkracují. Model tedy není použitelný pro poškození nízkou teplotou. [11] U běžných závodních automobilů předpokládáme vhodné podmínky skladování a proto tento model postačuje.

7.2 Motor

V této kapitole jsou popsány matematické vztahy umožňující převod spolehlivostních parametrů motoru pro různá zatížení. Tato kapitola je dále členěna podle vlivů působících na spolehlivost motoru.

7.2.1 Hmotnosti nasátého vzduchu

Pístový spalovací motor se opotřebovává prakticky každým zdvihem, ovšem sledovat počet zdvihů motoru není v praxi tak jednoduché a hlavně nevypovídá tolik o pracovním režimu motoru, tedy zatížení, které životnost velmi ovlivňuje. Pomocí řídicí elektroniky motoru je však možné sledovat množství vzduchu, které motor spotřeboval při tréninku, závodě, přejezdech a různých zkouškách. Ten je do motoru nasáván s každým zdvihem, ale jeho množství je řízeno pomocí škrtků klapky (v případě zážehových motorů) a proto je ovlivňováno i požadavkem na výkon a tedy i zatížení motoru. Zatížení motoru zpětně ovlivňuje různé degradační procesy jako tepelné a mechanické namáhání. Množství nasátého vzduchu však není pro spalovací proces tak důležité jako jeho hmotnost, protože ta je závislá na jeho hustotě, na kterou má vliv zejména nadmořská výška a teplota.

Opět je vhodné začít od běžných zkoušek, i zde platí poznatky zmíněné v úvodu kapitoly 7.1 s tím rozdílem, že k popisu tohoto celku je používáno Weibullovo rozdělení. Při zjišťování doby zkoušky, stejně jako u elektroniky, je potřeba vycházet ze zkoušky jediného výrobku bez poruchy, protože požadujeme, aby závod i trénink byly dokončeny bez poruchy. Dolní odhad střední doby do poruchy lze vypočítat podle vzorce 4.3 a pro zjednodušení jej upravit do této podoby (znaménko větší nebo rovno nahradit rovná se):

$$\left(\hat{T}_{SD}\right)^m = \frac{2 \cdot \tau_0^m}{\chi_{2v,1-\alpha}^2} \quad (7.41)$$

kde:

\hat{T}_{SD} – dolní odhad střední doby do poruchy

τ_0 – doba trvání zkoušky

$\chi_{2v,1-\alpha}^2$ – hodnota statistiky chí-kvadrát pro 2v stupňů volnosti

a hladinu významnosti α

m – parametr tvaru Weibullova rozdělení

Vzorec upravený pro výpočet zkoušky vypadá takto:

$$\tau_0 = \sqrt[m]{\frac{(\hat{T}_{SD})^m \cdot \chi_{2v,1-\alpha}^2}{2}} \quad (7.42)$$

Jako rozhodující faktor pro opotřebení je brána hmotnost nasátého vzduchu a proto je v tomto případě vhodné použít model mocninné inverzní křivky.

$${}^A\hat{T}_{SD} = \frac{1}{K \cdot V^n} \quad (7.43)$$

$${}^A\tau_0 = \frac{1}{K \cdot V^n} \quad (7.44)$$

kde:

${}^A\hat{T}_{SD}$ – dolní odhad střední doby do poruchy pro zrychlenou zkoušku

${}^A\tau_0$ – doba trvání zkoušky pro zrychlenou zkoušku

\hat{T}_{SD} – dolní odhad střední doby do poruchy

V – úroveň zatížení,

K, n – parametry modelu

Vyjádření faktoru zrychlení je stejné jako ve vzorcích 7.5 a 7.6.

Další postup vyjádření vzorce pro vyhodnocení zkoušky, tedy výpočtu dolního odhadu střední doby do poruchy, je analogický s postupem v kapitole 7.1.

$$\left({}^A\hat{T}_{SD}\right)^m = \frac{2 \cdot {}^A\tau_0^m}{\chi_{2v,1-\alpha}^2} \quad (7.45)$$

$${}^A\hat{T}_{SD} = \frac{\hat{T}_{SD}}{A_F} \quad (7.46)$$

$$\left(\frac{\hat{T}_{SD}}{A_F}\right)^m = \frac{2 \cdot {}^A\tau_0^m}{\chi_{2v,1-\alpha}^2} \quad (7.47)$$

$$\frac{\hat{T}_{SD}}{A_F} = \sqrt[m]{\frac{2 \cdot {}^A\tau_0^m}{\chi_{2v,1-\alpha}^2}} \quad (7.48)$$

$$\hat{T}_{SD} = A_F \cdot \sqrt[m]{\frac{2 \cdot {}^A\tau_0^m}{\chi_{2v,1-\alpha}^2}} \quad (7.49)$$

Podobně je tomu i při stanovení návrhového výpočtu zkoušky.

$${}^A\tau_0 = \sqrt[m]{\frac{\left({}^A\hat{T}_{SD}\right)^m \cdot \chi_{2v,1-\alpha}^2}{2}} \quad (7.50)$$

$${}^A\hat{T}_{SD} = \frac{\hat{T}_{SD}}{A_F} \quad (7.51)$$

$${}^A\tau_0 = \sqrt[m]{\frac{\left(\frac{\hat{T}_{SD}}{A_F}\right)^m \cdot \chi_{2v,1-\alpha}^2}{2}} \quad (7.52)$$

$${}^A\tau_0 = \frac{\hat{T}_{SD}}{A_F} \cdot \sqrt[m]{\frac{\chi_{2v,1-\alpha}^2}{2}} \quad (7.53)$$

Dále je uveden výpočet konstanty n , která není závislá na velikosti zatížení, ale je vlastností zkoumaného objektu. Parametr m Weibullova rozdělení, pokud jej neznáme, je nutné stanovit ze zkušeností s chováním objektu.

$$A_F^m = \frac{\left(K \cdot V_A^n\right)^m}{\left(K \cdot V_U^n\right)^m} \quad (7.54)$$

$$A_F = \frac{K \cdot V_A^n}{K \cdot V_U^n} \quad (7.55)$$

$$A_F = \left(\frac{V_A}{V_U}\right)^n \quad (7.56)$$

$$\ln A_F = \ln\left(\frac{V_A}{V_U}\right)^n \quad (7.57)$$

$$\ln A_F = n \cdot \ln\left(\frac{V_A}{V_U}\right) \quad (7.58)$$

$$n = \frac{\ln A_F}{\ln\left(\frac{V_A}{V_U}\right)} \quad (7.59)$$

$$A_F^m = \frac{\left(K \cdot V_A^n\right)^m}{\left(K \cdot V_U^n\right)^m} = \frac{\frac{2 \cdot \tau_U^m}{\chi_{2v,1-\alpha}^2}}{\frac{2 \cdot \tau_A^m}{\chi_{2v,1-\alpha}^2}} = \frac{\tau_U^m}{\tau_A^m} \quad (7.60)$$

$$A_F = \frac{K \cdot V_A^n}{K \cdot V_U^n} = \frac{\frac{\sqrt[m]{2} \cdot \tau_U}{\sqrt[m]{\chi_{2v,1-\alpha}^2}}}{\frac{\sqrt[m]{2} \cdot \tau_A}{\sqrt[m]{\chi_{2v,1-\alpha}^2}}} = \frac{\tau_U}{\tau_A} \quad (7.61)$$

$$n = \frac{\ln \frac{\tau_U}{\tau_A}}{\ln \left(\frac{V_A}{V_U} \right)} \quad (7.62)$$

kde:

m – parametr Weibullova rozdělení

A_F – faktor zrychlení

V_U – velikost zatížení při první zkoušce

V_A – velikost zatížení při druhé zkoušce

K, n – parametry modelu

τ_U – doba trvání první zkoušky

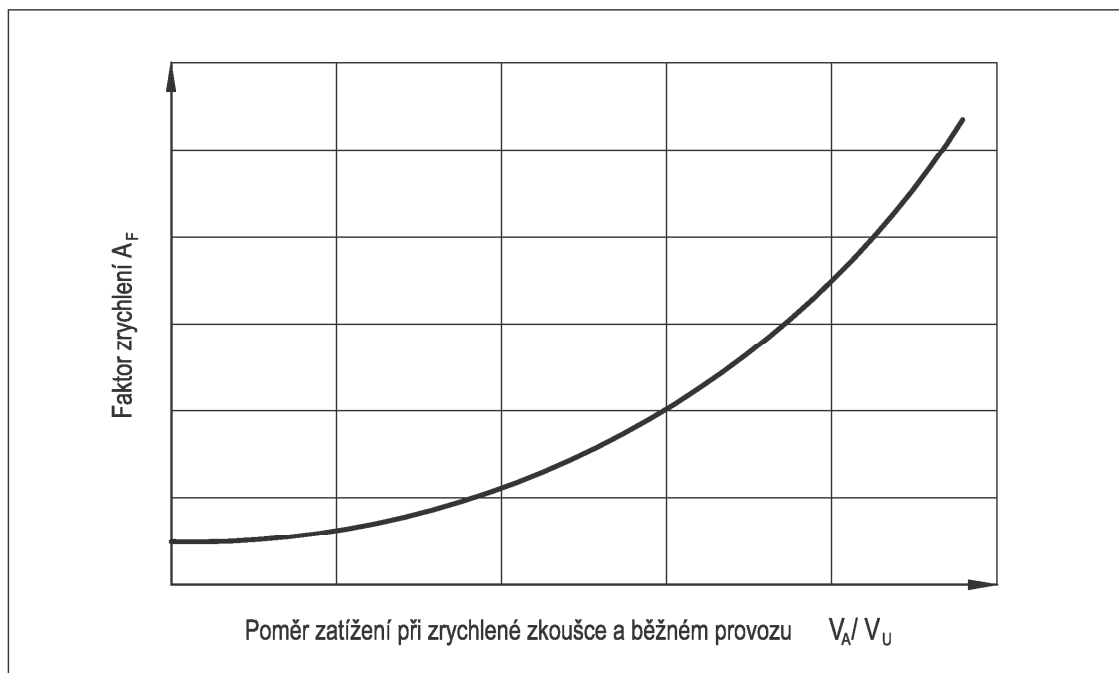
τ_A – doba trvání druhé zkoušky

$\chi_{2v,1-\alpha}^2$ – hodnota statistiky chí-kvadrát pro $2v$ stupňů volnosti

a hladinu významnosti α

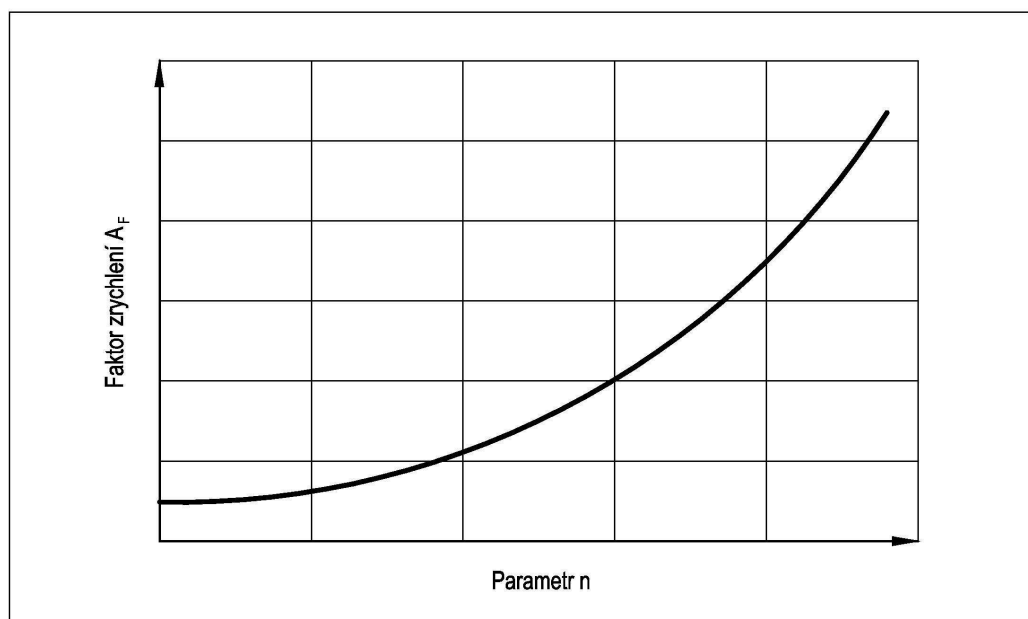
n – parametry modelu

Závislost faktoru zrychlení na poměru zatížení při zrychlené zkoušce a při běžném provozu je exponenciální. Tedy se zvětšujícím se rozdílem zatížení při testování a závodě, roste pravděpodobnost výskytu poruchy poměrně ostře (nelineárně) jak ukazuje graf 7.8. Opotřebený motor vlivem větších vůlí, ale i stárnutím materiálů atd. nepracuje již v optimálních podmínkách a tím je namáhán ještě více. V praxi se setkáváme s tím, že motor dokáže pracovat po určitou dobu bez vážnější poruchy, ale poté se doba mezi poruchami začne rychle zkracovat, jak ukazuje vanová křivka v grafu 2.1.

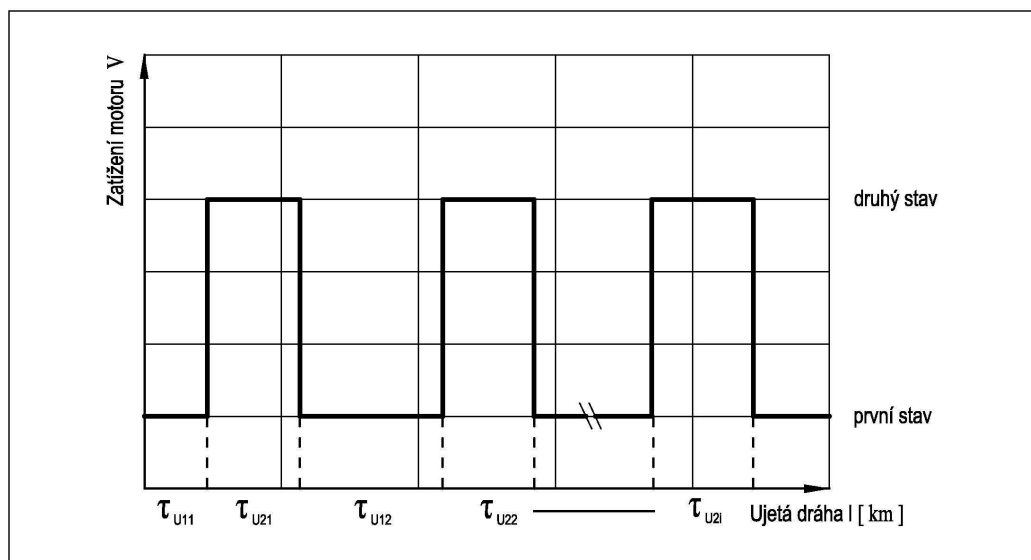


Graf 7.8: Závislost faktoru zrychlení na hmotnosti vzduchu

Parametr modelu n je charakteristický pro jednotlivé motory, vyjadřuje jeho citlivost na sledovaný parametr, v tomto případě na hmotnost spotřebovaného vzduchu. Podobně jako v Arrheinově modelu, lze jej zpětně dopočítat, z měření na dvou úrovních zatížení. Je možné ho také použít k posouzení několika konstrukcí motorů. Závislost faktoru zrychlení na jeho hodnotě je patrná z grafu 7.9.

Graf 7.9: Závislost faktoru zrychlení na parametru n

I závodní automobily bývají někdy provozovány ve více režimech. Například při rallye, kdy se nejen závodí, ale je nutné s vozidlem přejet od jedné rychlostní zkoušky ke druhé, a to v běžném provozu. Je jasné, že zatížení při obou režimech je velmi rozdílné. Pro stanovení a kontrolu životnosti je vhodné, vzhledem k poměrně velkým přejezdovým vzdálenostem, zohlednit oba tyto stavy. Příklad takového provozu je v grafu 7.10.



Graf 7.10: Příklad vstupních dat

V tomto případě lze postupovat analogicky ke kapitole 7.1, tedy rozložit provozní stav a zkoušku na dvě období s různým faktorem zrychlení a spočítat dobu zkoušky nebo její vyhodnocení pro jednotlivé stavy.

Tento postup je výhodný zejména při zkouškách motoru na brzdě. Zrychlenou zkoušku lze provádět pod jedním zatížením. Její délka bude součtem požadovaných minimálních dob do poruchy pro oba stavy přepočtené s různými faktory zrychlení.

$$\tau_{A1} = \frac{\hat{T}_{SD1}}{\left(\frac{V_A}{V_{U1}}\right)^n} \cdot \sqrt[m]{\frac{\chi_{2v,1-\alpha}^2}{2}} \quad (7.63)$$

$$\tau_{A2} = \frac{\hat{T}_{SD2}}{\left(\frac{V_A}{V_{U2}}\right)^n} \cdot \sqrt[m]{\frac{\chi_{2v,1-\alpha}^2}{2}} \quad (7.64)$$

$$\tau_A = \tau_{A1} + \tau_{A2} \quad (7.65)$$

kde:

m – parametr Weibullova rozdělení

V_{U1} – velikost zatížení v provozu při prvním režimu

V_{U2} – velikost zatížení v provozu při druhém režimu

V_A – velikost zatížení při zrychlené zkoušce

$\chi^2_{2v,1-\alpha}$ – hodnota statistiky chí-kvadrát pro $2v$ stupňů volnosti
a hladinu významnosti α

τ_{A1} – doba trvání zrychlené zkoušky v prvním stavu

τ_{A2} – doba trvání zrychlené zkoušky ve druhém stavu

\hat{T}_{SD1} – dolní odhad střední doby do poruchy pro první režim

\hat{T}_{SD2} – dolní odhad střední doby do poruchy pro druhý režim

n – parametry modelu

τ_A – celková doba zkoušky

τ_{A1} – doba trvání zrychlené zkoušky v prvním stavu

τ_{A2} – doba trvání zrychlené zkoušky ve druhém stavu

7.2.2 Množství spotřebovaného paliva

Opotřebení motoru lze také hodnotit pomocí množství spotřebovaného paliva. Děje se tak například u zahradní techniky nebo jiných strojů. Na spotřebované množství paliva mají největší vliv:

- Doba, po kterou motor běžel – zde se projevuje délka závodu nebo testu.
- Režim a zatížení, ve kterém pracoval – zde se projevuje požadovaný výkon a otáčky, vliv na spotřebu má zejména prudké zvýšení otáček pod zatížením (akcelerace vozidla), kdy je potřeba další výkon k překonání odporů vozidla. Spotřebou lze tedy hodnotit i zatížení motoru.

K přepočtu spolehlivostních parametrů při různém zatížení lze použít stejně jako v předchozím případě model inverzní mocninné křivky, kde zatížení bude představovat množství spotřebovaného paliva. Tento způsob je použitelný i u starších motorů historických závodních automobilů, které nejsou vybaveny elektronickým řízením motoru s možností ukládání dat z provozu, ale je možné sledovat množství spotřebovaného paliva.

Samotné vztahy pro výpočty různých veličin jsou shodné s těmi, které jsou uvedeny v předcházející kapitole.

7.2.3 Střední pístová rychlost

Dalším parametrem s velkým vlivem na životnost a tedy i spolehlivost je střední pístová rychlost. Je to dráha uražená pístem za časovou jednotku. S jejím zvyšováním rostou tedy i otáčky a zrychlení – je nutné si uvědomit, že píst se u běžných dvoudobých a čtyřdobých motorů v obou úvratích musí zastavit. Dále stoupá i uhlová rychlost klikového hřídele atd. Lze tedy očekávat větší opotřebení u motorů, které mají vyšší pístovou rychlost. S otáčkami roste střední pístová rychlost a zrychlení. Toto je dobře patrné například u motocyklových motorů, které díky vysokým otáčkám dosahují i vysokých litrových výkonů. Jejich životnost je ale podstatně nižší oproti motorům v užitkových vozidlech, které jsou konstruovány pro práci v nižších otáčkách. Otáčky tedy souvisí i s výkonem, respektive s jeho využíváním, ale neukazují tak přesně zatížení motoru jako ukazatele z předchozích kapitol. Vztah mezi střední pístovou rychlostí, zdvihem a otáčkami je uveden ve vzorci 7.66:

$$c_s = 2 \cdot z \cdot \frac{n}{60} \quad (7.66)$$

kde:

c_s – střední pístová rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

z – zdvih motoru [m]

n – otáčky motoru [s^{-1}]

V provozu lze těžko měřit střední pístovou rychlost, ale lze ji pomocí vzorce 7.66 vypočítat z otáček motoru. Jsou-li tedy známy otáčky ve kterých se motor nejčastěji pohyboval například při závodě, lze vypočítat i střední pístovou rychlost pro tento závod.

7.3 Převodovka

Jak již bylo uvedeno v kapitole 6.3, při každém řazení dochází k opotřebení, i když jen zcela nepatrnému a to může postupně vést ke vzniku poruchy. Stav převodovky je tedy možné odvozovat od počtu řazení. Jedná se samozřejmě o jisté zjednodušení, protože vliv na opotřebení mají i jiné faktory, ale tento lze považovat za nejdůležitější.

Jako nejlepší varianta zrychlení zkoušky se jeví větší využití prvku. Zkouška musí být prováděna pod zatížením, například na převodovce zamontované ve vozidle s koly brzděnými válcovou zkušební výkonu. Při zkoušce dochází k častějšímu řazení než při běžném provozu. Musí se provést takový počet řazení, který odpovídá požadované životnosti. Je tedy vyžadován údaj o počtu řazení ze závodů, tréninků a přejezdů do konce očekávané životnosti převodovky. Ten se samozřejmě může lišit pro různé jezdce. K jeho odhadu lze využít například normální rozdělení. V tomto případě může posloužit „pravidlo tři sigma“, které říká [1]:

$$P(\mu - 3\sigma < T < \mu + 3\sigma) = 0,9973 \quad (7.66)$$

μ – střední hodnota,

T – náhodná veličina,

σ – směrodatná odchylka.

Tedy, že náhodná veličina T , leží s pravděpodobností 0,9973 v intervalu $\mu \pm 3\sigma$. Podobně platí [1]:

$$P(\mu - 2\sigma < T < \mu + 2\sigma) = 0,9945 \quad (7.67)$$

$$P(\mu - \sigma < T < \mu + \sigma) = 0,6827 \quad (7.68)$$

8 Příklady

V této kapitole jsou uvedeny příklady stanovení doby spolehlivostních zkoušek pro některé celky vozidla.

Je důležité si uvědomit, že pracujeme s náhodnou veličinou. To znamená, že pokud provádíme pouze jednu zkoušku, může být její výsledek značně zkreslený, právě vlivem náhodného působení. Z toho důvodu je při zkoušce nutné najet několikanásobně víc kilometrů nebo zkoušený celek musí pracovat po delší dobu, než je požadovaná minimální doba do poruchy. Pouze takováto zkouška nám dává jistotu požadované bezporuchovosti.

8.1 Elektronika

Zkoušky elektronických částí závodních automobilů vycházejí z tepelně zrychlených zkoušek, které běžně používají výrobci při zjišťování životnosti. Namáhání součástky je kromě kolísání teploty také ovlivňováno přivedeným napětím. V případě závodních automobilů však, vzhledem k aplikaci moderních polovodičových regulátorů napětí, nelze předpokládat jeho velké kolísání v provozu, ale je možné rozlišovat jeho hodnoty podle

provozního stavu. Tato zkouška tedy nezohledňuje pouze teplotu, při které elektronický prvek pracuje, ale i v jakém provozním stavu se součástka nachází. Velkým zdrojem tepla je motor a jeho příslušenství např. výfukový systém. Je třeba také počítat s tím, že některé prvky (zejména odpory a cívky) se při práci samovolně zahřívají. Teplota v motorovém prostoru je ovlivňována teplem vyzařovaným motorem a jeho příslušenstvím a také prouděním vzduchu v tomto prostoru. Pracovní teplota elektronického prvku, který je zde umístěn, může být tedy různá pro různé provozní podmínky a pro použití zde uvedeného matematického modelu je třeba ji měřit a zaznamenávat. Při umisťování těchto součástí je také třeba myslet na to, aby nebyly namáhány rychlým střídáním teplot, protože model pracuje s průměrnými teplotami, došlo by tak k velkému zkreslení výsledku a výpočet by byl nepoužitelný.

Ukázkový výpočet je pro řídicí jednotku motoru. Její očekávaná životnost je 2 roky což představuje $\tau_U = 17520$ hodin. Z toho přibližně 400 hodin závodních, to představuje součet všech časů, kdy je řídicí jednotka pod provozním napětím – závody, přejezdy, tréninky, testy atd. Zbytek tedy 17120 hodin představuje režim uskladnění vozu. Víme, že pracovní teplota řídicí jednotky je přibližně 60 °C a při skladování asi 20 °C. Je požadováno, aby obě části zkoušky probíhaly při stejné teplotě. Uvažujeme případ extrémní zkoušky jednoho prvku na hladině významnosti $\alpha=0,1$.

Nejprve je nutné zjistit parametr B . K tomu poslouží dvě měření životnosti při různých teplotách.

Tab. 8.1: Životnost při zatížení

Teplota [°C]	Teplota [K]	Životnost [h]
60	334	2923
90	364	984

Pak lze dosadit do vzorce 7.24:

$$B = \frac{\ln \frac{\tau_{U1}}{\tau_{A1}}}{\left(\frac{1}{T_{U1}} - \frac{1}{T_{A1}} \right)} = \frac{\ln \frac{2923}{984}}{\left(\frac{1}{334,15} - \frac{1}{364,15} \right)} = 4415$$

Vypočítáme počet stupňů volnosti pro rozdělení chí-kvadrát. Při návrhu zkoušky je vhodnější uvažovat se vznikem jedné poruchy, tedy $r=1$:

$$v = r + 1 = 1 + 1 = 2$$

Nyní lze přistoupit přímo k návrhu zkoušky, dle vzorce 7.39 a 7.40:

$$\tau_{A1} = \frac{\hat{T}_{SD1} \cdot \chi_{2,2,1-\alpha}^2}{2 \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{T_{U1}} - \frac{1}{T_A} \right)}} = \frac{400 \cdot 7,8}{2 \cdot e^{4415 \cdot \left(\frac{1}{334} - \frac{1}{364} \right)}} = 525 \text{ h}$$

$$\tau_{A2} = \frac{\hat{T}_{SD1} \cdot \chi_{2,2,1-\alpha}^2}{2 \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{T_{U2}} - \frac{1}{T_A} \right)}} = \frac{17520 \cdot 7,8}{2 \cdot e^{4415 \cdot \left(\frac{1}{294} - \frac{1}{364} \right)}} = 3805 \text{ h}$$

Celková doba zkoušky je, dle vzorce 7.32:

$$\tau_A = \tau_{A1} + \tau_{A2} = 525 + 3805 = 4330 \text{ h}$$

Pro lepší představu je vhodné uvést dobu, po kterou by trvala běžná zkouška nutná k prokázání splnění požadavků na spolehlivost:

$$\tau_1 = \frac{\hat{T}_{SD} \cdot \chi_{2v,1-\alpha}^2}{2} = \frac{400 \cdot 7,8}{2} = 1560 \text{ h}$$

$$\tau_2 = \frac{\hat{T}_{SD} \cdot \chi_{2v,1-\alpha}^2}{2} = \frac{17520 \cdot 7,8}{2} = 68328 \text{ h}$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = 1560 + 68328 = 69888 \text{ h}$$

Podle vzorce 7.5 by celkový faktor zrychlení v tomto případě byl:

$$A_F = \frac{\tau}{\tau_A} = \frac{69888}{4330} = 16,1$$

8.2 Motor

Jak již bylo popsáno výše, závodní motory pracují s velmi často se měnícím zatížením. Ke zkoušce je však třeba použít průměrné hodnoty vztažené např. na ujetou vzdálenost, nebo v případě zkoušek na zkušebním zařízení, na časovou jednotku. Chceme-li zkoušku urychlit, je nutné zatěžovat motor neustále na plný výkon tak, aby jeho měrná spotřeba vzduchu byla vyšší než při závodě. V praxi jsou tyto poznatky použitelné asi jen pro laboratorní zkoušky, kdy umožňují jejich zrychlení. Vztah pro zrychlené zkoušky také umožňuje vzájemný přepočet očekávané životnosti v závislosti na zjištěném zatížení, což lze použít nejen pro zkoušky, ale například i k úpravám servisních intervalů. Životnost u závodního motoru nemusí být omezena jen poruchou, ale také vznikem takového opotřebení, které už mu neumožňuje poskytovat požadovaný výkon.

8.2.1 Běžné zkoušky

V této kapitole bude vysvětlen výpočet jízdní zkoušky k prokázání požadované spolehlivosti. K tomu mi poslouží dříve zmiňované extrémní případy zkoušek.

Nejprve je nutné znát požadavky kladené na spolehlivost. Je očekávána co nejvyšší pravděpodobnost dokončení závodu bez poruchy a z toho vychází také zkouška. To platí i pro jeden z nejdelších závodů Mistrovství světa v rallye, který má asi 482 km a dále je najeto dalších přibližně 120 km v závodním tempu při testech funkčnosti a nastavení.

$$\hat{T}_{SD} = 482 + 120 = 602 \text{ km}$$

Obvyklá hodnota parametru m Weibullova rozdělení pro motory je 1,5. Protože je požadována co nejvyšší spolehlivost, je vhodné zvolit hladinu významnosti $\alpha=0,01$ a vypočtenou dobu zkoušky prodloužit tím, že počítáme se vznikem 1 poruchy.

$$v = r + 1 = 1 + 1 = 2$$

Testy životnosti jsou někdy prováděny na druhém vozidle, které je shodné se závodním, ale není určeno k vlastním závodům. Zkouška probíhá tak, že se s tímto automobilem najedou určité kilometry v závodním a přejezdovém režimu k prokázání požadované bezporuchovosti. Jedná se tedy ve své podstatě o zkoušku jediného prvku. Návrh takové zkoušky, respektive stanovení její délky, lze udělat pomocí vzorce 7.42:

$$\tau_1 = \sqrt[m]{\frac{(\hat{T}_{SD})^m \cdot \chi_{2v,1-\alpha}^2}{2}} = \sqrt[1,5]{\frac{(602)^{1,5} \cdot 13,28}{2}} = 2127 \text{ km}$$

Dále může být požadována kontrola servisních intervalů. Ty jsou samozřejmě přizpůsobovány závodům, tak aby nebylo třeba vůz odstavovat během závodu. Servisní interval mohou tvořit dva po sobě jdoucí závody, tak jak je to v následující tabulce 8.3:

Tab. 8.3: Závodní kilometry

	<i>závod [km]</i>	<i>testy [km]</i>	<i>celkem [km]</i>
Rally Argentina	482	120	602
Acropolis Rally	410	120	530
celkem [km]			1132

Servisní interval by tedy v tomto případě byl asi 1200 závodních kilometrů. Mezi těmito závody a testy je možné vůz kontrolovat, proto bude stačit hladina významnosti 0,1. Výpočet je podobný předešlému:

$$\tau_2 = \sqrt[m]{\frac{(\hat{T}_{SD})^m \cdot \chi_{2v,1-\alpha}^2}{2}} = \sqrt[1,5]{\frac{(1200)^{1,5} \cdot 7,8}{2}} = 2973 \text{ km}$$

Dalším milníkem života motoru je jeho celková oprava, jejíž provedení je naplánováno při proběhu přibližně 7200 závodních kilometrů. Po tuto dobu musí být motor udržován a kontrolován v servisních intervalech, kterých bude asi šest. To nám umožňuje udržet bezporuchovost na požadované úrovni a snižuje nároky na inherentní spolehlivost. Z tohoto důvodu může být hladina významnosti 0,3. Lze vypočítat na kolik kilometrů se musí motor testovat k prokázání požadované spolehlivosti.

$$\tau_3 = \sqrt[m]{\frac{(\hat{T}_{SD})^m \cdot \chi_{2v,1-\alpha}^2}{2}} = \sqrt[1,5]{\frac{(7200)^{1,5} \cdot 4,9}{2}} = 13085 \text{ km}$$

Do testů životnosti je třeba zahrnout i přejezdové kilometry. Postup stanovení požadavků na jejich zkoušky je shodný s předešlými výpočty. Pro přehlednost jsou výsledky uvedeny v tabulce 8.4.

Tab. 8.4: Přejezdové kilometry

	požadavek [km]	délka testu [km]
<i>jeden závod</i>	650	2 296
<i>do servisního intervalu</i>	1 300	3 221
<i>do celkové opravy motoru</i>	8 450	15 357

Zkouška k prokázání požadované spolehlivosti a pro ověření servisního intervalu probíhají pod stejným zatížením a za stejných podmínek, proto stačí vybrat vyšší hodnotu z vypočtených dob trvání zkoušky τ_1 , τ_2 a tu ověřit (v tomto případě τ_2). Zkouška k prokázání požadované životnosti do celkové opravy motoru, musí probíhat po dobu τ_3 při běžných servisních intervalech a ošetřování motoru dle pokynů výrobce. Obdobný je postup při ověřování životnosti v přejezdovém režimu.

8.2.2 Zrychlené zkoušky

Z předešlého příkladu je patrné, že při stanovení servisních intervalů nejsou nijak zohledňovány kilometry, najeté v přejezdovém režimu. Zrychlené zkoušky nám umožní jejich přepočet na závodní.

Opět je nutné provedení dvou měření životnosti na různých úrovních zatížení. Zde se nabízí testování při závodním nasazení a při přejezdu. Je ale nutné zaznamenávat nejen dráhu do poruchy či mezního opotřebení, ale i hmotnost vzduchu průměrně spotřebovaného na 1 km jízdy v obou režimech. Důležitou veličinou je faktor zrychlení:

$$A_F = \frac{L_U}{L_A} = \frac{33641}{10132} = 3,32$$

Faktor zrychlení umožňuje přepočítání přejezdových kilometrů na závodní. Zde je uvedeno kolik závodních kilometrů představují přejezdové v období mezi servisními intervaly.

$$L_Z = \frac{L_P}{A_F} = \frac{1300}{3,32} = 392 \text{ km}$$

Další možnost využití zrychlených zkoušek je při návrhu zkoušek na motorové brzdě. Nejprve je třeba stanovit velikost parametru modelu n .

$$n = \frac{\ln \frac{\tau_U}{\tau_A}}{\ln \left(\frac{V_A}{V_U} \right)} = \frac{\ln \frac{33641}{10132}}{\ln \left(\frac{6,05}{2,52} \right)} = 1,37$$

Pak dobu pro jednotlivé části zkoušky lze vyjádřit takto:

$${}^A\tau_1 = \frac{\hat{T}_{SD1}}{\left(\frac{V_A}{V_{U1}} \right)^n} \cdot \sqrt[m]{\frac{\chi_{2v,1-\alpha}^2}{2}} = \frac{89}{\left(\frac{7,11}{6,05} \right)^{1,37}} \cdot \sqrt[1,5]{\frac{4,9}{2}} = 130 \text{ h}$$

$${}^A\tau_2 = \frac{\hat{T}_{SD2}}{\left(\frac{V_A}{V_{U2}} \right)^n} \cdot \sqrt[m]{\frac{\chi_{2v,1-\alpha}^2}{2}} = \frac{129}{\left(\frac{7,11}{2,52} \right)^n} \cdot \sqrt[1,5]{\frac{4,9}{2}} = 57 \text{ h}$$

Celková doba zkoušky na motorové brzdě pod maximálním zatížením potom bude:

$${}^A\tau = {}^A\tau_1 + {}^A\tau_2 = 130 + 57 = 187 \text{ h}$$

9 Závěr

Aplikace zrychlených zkoušek spolehlivosti u závodních vozidel je výhodná z těchto důvodů:

1. Jde o kusovou výrobu s využitím špičkových technologií a materiálů. Proto je třeba omezit počet součástí, které se při zkouškách znehodnotí.
2. Vývoj v této oblasti je velmi rychlý a žádá si zrychlení zdoluhavých zkoušek spolehlivosti. Díky zrychleným zkouškám spolehlivosti lze aplikovat nejnovější poznatky z oblasti vývoje do provozu v reálném čase a přitom se zaručenou spolehlivostí
3. Náklady na přípravu a účast v závodech jsou vysoké a mají vést k úspěšnému dokončení, což je podmíněno spolehlivostí všech komponent vozidla.

Zkoušky nelze optimálně navrhnout bez hlubší znalosti matematických nástrojů pro tvorbu zkušebních plánů. Těmto nástrojům jsou věnovány kapitoly 3, 4, 5.

Abychom vybrali optimální variantu zkoušky a matematického modelu musíme znát specifika závodních vozidel a automobilového sportu jako takového. Tuto problematiku shrnuje kapitola 6.

Kapitola 7 již obsahuje konkrétní aplikace matematických modelů na vybrané části závodních vozidel.

V 8. kapitole jsou ukázkové výpočty pro elektroniku a motor.

V kapitole 8.1 je příklad návrhu zrychlené zkoušky řídicí jednotky automobilu. Zrychlení je dosaženo zvýšením teploty. Pomocí Arrheinova modelu byly převedeny nepravidelné zátěžové cykly na dva stavy. Prakticky se řídicí jednotka umístí do zkušební komory, kde se ponechá po vypočítanou dobu odpočívat a další určenou dobu pracovat pod napětím. Její funkčnost se po dobu zkoušky pravidelně kontroluje. Pokud testovaná řídicí jednotka si po dobu zrychlené zkoušky zachová funkčnost, lze s předem stanovenou pravděpodobností očekávat spolehlivý provoz zkoušené série.

V kapitole 8.2 je na konkrétním příkladu ukázáno jak lze pomocí matematického modelu přepočítat ujeté kilometry nebo motohodiny při různých zatíženích na jednu

hladinu. Lze tedy převést například přejezdové kilometry na závodní, což se jeví jako přínosné při určování servisních intervalů. Počet přejezdových kilometrů se velmi liší závod od závodu a dosud nebyly zohledňovány při servisních intervalech. Dále je v této kapitole uveden i výpočet doby zrychlené zkoušky motoru na motorové brzdě při zvýšeném zatížení.

Uvedené příklady ukazují jak jsou matematické metody užitečné a adaptabilní i pro tak specifickou oblast jako je automobilový sport.

Seznam použitých pramenů

- [1] FAMFULÍK, Jan, Radek KRZYŽANEK a Peter GALVAS. *Zkoušky spolehlivosti: (vybrané stochastické metody)*. Ostrava: VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2010. ISBN 978-80-248-2277-8.
- [2] FAMFULÍK, Jan; MÍKOVÁ, Jana; KRZYŽANEK, Radek. *Teorie údržby* [online]. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2007. Dostupné z WWW: <<http://homel.vsb.cz/~krz011/>>. ISBN 978-80-248-1509-1.
- [3] KRZYŽANEK, Radek. *Stanovení spolehlivostních charakteristik nové generace modulu automatického vedení vlaku (AVV)*. Ostrava, 2010. Disertační práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Škapa, CSc.
- [4] DORDA, Michal. *Aplikace počítačů v provozu* [online]. 2011 [cit. 2011-05-14]. Odhad parametrů základního souboru. Dostupné z WWW: <<http://homel.vsb.cz/~dor028/>>.
- [5] Accelerated Life Testing Analysis [online]. [cit. 2013-01-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.weibull.com/acceltestwebcontents.htm>>.
- [6] PRAVDA, Pavel. *Jak funguje sekvenční převodovka?* [online]. 2006 [cit. 2013-01-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.ewrc.cz/ewrc/show.php?id=3441&title=jak-funguje-sekvencni-prevodovka?>>>.
- [7] MACKERLE, Julius. *Motory závodních automobilů*. Praha: SNTL, 1980, 196 s. L13-B3-IV-31122645.
- [8] PAPOUŠEK, Miroslav a Pavel ŠTĚRBA. *Diagnostika spalovacích motorů*. 2., aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2007, 223 s. Auto-moto-profi (Computer Press). ISBN 978-80-251-1697-5.
- [9] VYORAL, Karel. *Spolehlivost a provozní vlastnosti kondenzátorů*. [online]. 2005-09-01 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: WWW: <http://www.es-ostrava.cz/pdf/Spolehlivost.pdf> .
- [10] POLSTEROVÁ, Helena. *Spolehlivost v elektrotechnice*, skriptum VUT Brno.
- [11] *Zrychlené zkoušky bezporuchovosti a možnosti jejich praktické aplikace: materiály z 39. setkání odborné skupiny pro spolehlivost : Brno, červen 2010* [online]. 1. vyd. Praha:

Česká společnost pro jakost, 2010, 39 s. [cit. 2013-05-06]. ISBN 978-80-02-02062-2.
Dostupné z: WWW: <http://www.csq.cz/res/data/020/002502.pdf>.

[12] Podklady k předmětu: *Bezpečnost a zkoušení silničních vozidel*.

[13] ELIÁŠ, Petr. *Čím se liší jednotlivé kategorie závodních aut?* [online]. 2006 [cit. 2013-01-04]. Dostupné z WWW: <http://www.ewrc.cz/ewrc/show.php?id=2787>>.